

道路政策の質の向上に資する技術研究開発
成果報告レポート
No. 2020-5

研究テーマ

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：大阪公立大学准教授	吉田 長裕
共同研究者：徳島大学研究部長	山中 英生
文教大学准教授	松本 修一
日本自動車研究所主任研究員	平岡 敏洋
文教大学教授	川合 康央
埼玉大学准教授	小嶋 文
東京都市大学准教授	稲垣 具志

令和 6 年 5 月

新道路技術会議

目次

研究概要	1
第1章 はじめに	3
1. 1 背景.....	3
1. 2 目的.....	3
第2章 国内・海外の既存研究状況	4
2. 1 ドライブレコーダによる車道上自転車事故の類型化と特性分析	4
2. 2 事故データによる車道上自転車事故の類型化と特性分析.....	8
2. 3 大規模信号交差点における利用者挙動のビデオ観測調査.....	11
第3章 モバイルプローブ自転車を用いた自転車走行環境と利用者挙動との関連分析	16
3. 1 モバイルプローブ自転車の動作検証	16
3. 2 モバイルプローブ自転車を使った交差点調査.....	22
3. 3 モバイルプローブ自転車を使った交差点調査.....	28
第4章 協調型ドライビングシミュレータを使用した協調行動実験.....	33
4. 1 シミュレータシステムの再現性検証実験	33
4. 2 夜間におけるシミュレータシステムの再現性検証実験	36
4. 3 シミュレータ環境のオープン化と仮想実験コースの作成.....	41
第5章 協調型サイクルシミュレータシステムによる交通コンフリクト実験.....	43
5. 1 はじめに.....	43
5. 2 既往研究と本研究のアプローチ	43
5. 3 実験の概要	44
5. 4 実験結果.....	46
5. 5 おわりに.....	49
第6章 実験に基づいた車道上の自転車の安全改善策と持続可能な安全向上策の検討	51
6. 1 交通安全向上策のまとめ：大規模信号交差点	51
6. 2 交通安全向上策のまとめ：単路・トンネル.....	53

**「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」(令和3年度採択)
研究概要**

番号	研究課題名	研究代表者
No. 2020-5	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	大阪公立大学大学院工学研究科・准教授

この調査は、車道における自転車と自動車の交通事故に焦点を当て、特に主要交差点での事故に焦点を当てている。これらの地点は、様々な分析から重大事故のリスクが高い。このプロジェクトは、開発された協調型自転車シミュレータ(CCS)を用いた交通衝突実験を通じて、重大事故の減少に貢献する安全対策を提案し、道路交通システムの設計段階に反映されるべき持続可能な安全対策を漸進的に改善することを目的としている。

1. 研究の背景・目的

本研究では、車道上自転車と自動車の交通事故に着目し、とくに重大事故に至りやすい夜間や単路、坂道、大規模交差点等での交通コンフリクト状態を個別開発されてきたツールと連携し、サイクルシミュレータ(CS)上で再現・実験することにより、高い安全性を発揮できる事故対策の提案と、道路交通システムの設計段階に反映すべき持続可能な安全を段階的に高める方策の提案を目的として行うものである。

2. 研究内容

以下の5つの項目について研究を行う。

- 1) ドライブレコーダ、事故データ分析による車道上自転車事故の類型化と特性分析
SIP マクロ分析結果、タクシー搭載ドライブレコーダデータによるヒヤリハット事象の詳細分析、全国の事故データを活用して重大事故の特徴を明らかにする。また、実交差点における観測調査と動画解析手法により、危険な錯綜パターンの類型化を行う。
- 2) モバイルプローブ自転車(MPB)を用いた自転車走行環境と利用者挙動との関連分析
自転車に Lidar センサーを搭載し、道路単路区間における自転車追越時の自動車挙動検証を行うと共に、交差点左折車の衝突余裕時間 TTC の直接観測を試み、どのような条件で危険な錯綜となるのかを交差点条件と車両挙動の関係性ととも明らかにする。
- 3) 協調型ドライビングシミュレータ(DS)を使用した協調行動実験
投影/ヘッドマウントタイプの協調型シミュレータを構築し、交差点条件の違いによる錯綜危険度への影響を客観・主観評価の両面から明らかにする。また、仮想実験コースの作成とオープン化のために、実都市データに基づいた3次元仮想空間 DS・CS 環境の構築を行い、Protected 型交差点や自転車専用信号を加えて、仮想空間において実験ができるようにする。
- 4) 協調型サイクルシミュレータ(CCS)システムによる交通コンフリクト実験
衝突等の危険な錯綜を含む実験を安全に行うことができる協調型サイクリングシミュレータを用いて仮想空間上で再現実験を行い、交通安全対策や自転車走行への影響の観点から評価を行う。
- 5) 実験に基づいた車道上の自転車の安全改善策と持続可能な安全向上策の検討
大規模信号交差点及び単路・トンネル区間における調査・分析・実験結果を比較・整理することで、道路構造、交通条件、設計要素にわけて自転車の安全改善策の提案を行う。

3. 研究成果

- ・ SIPマクロ分析とタクシー搭載ドライブレコーダデータによるヒヤリハット事象の詳細分析により、出会い頭、左折時、追突、単独路外逸脱の類型を抽出できた。また、信号交差点においては自動車左折時のブラインドスポット関連事故が課題であることがわかった。実態調査では、左折車の特徴や自転車通行パターンによる錯綜危険度評価を行うことが出来た。
- ・ Lidar センサーを搭載したプローブ自転車を使って、自転車視点からの衝突余裕時間の直接観測が可能であることがわかり、交差点隅角部のブラインドスポットにおける TTC 算出上の制約条件についても整理することが出来た。
- ・ 協調型ドライビングシミュレータ(DS)を使用した協調行動実験では、複数のシミュレータ性能の違いを検証し、協調行動の実験により運転行動の変化が衝突余裕時間に与える影響につい

でも検証を行った。また、オープンデータを活用した、実都市データに基づいた3次元仮想空間におけるDS及びCS環境を構築し、基礎的な実験ができることも検証した。

- ・DSとCSを接続した協調型サイクルシミュレータを構築し、自動車と自転車の交通錯綜（コンフリクト）現象を緩和するための交通安全対策として、交差点の隅角部などの諸条件の変更による影響をシミュレータ実験により明らかにした。
- ・事故分析や観測調査に加え、シミュレータによる実験結果を整理することで、危険な錯綜が起きづらい持続可能な安全向上策を、道路構造、交通条件別の設計要素として提案をおこなった。

4. 主な発表論文

- 1) 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, 2021年7月.
- 2) 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, Issue 2, pp. A_273-A_280, 2022年2月.
- 3) 山中英生, 山田一太, 松本修一, 吉田長裕: 協調型シミュレータを用いた信号交差点における自転車・自動車錯綜分析, 第42回交通工学研究発表会論文集(研究論文), pp. 709-714, 2022年8月.
- 4) Nagahiro YOSHIDA, Hideo YAMANAKA, Shuichi MATSUMOTO, Toshihiro HIRAOKA, Yasuhiro KAWAI, Aya KOJIMA, and Tomoyuki INAGAKI: Development of Safety Measures of Bicycle Traffic by Observation with Deep-Learning, Drive Recorder Data, Probe Bicycle with LiDAR, and Connected Simulators, 10th Annual International Cycling Safety Conference, November 2022.
- 5) 神林怜, 松本修一, 櫻井淳, 山中英生, 吉田長裕: 協調型シミュレータを用いた高齢ドライバーに対する左折時自転車錯綜リスクの評価, 交通工学研究会, 交通工学論文集, Vol. 9, Issue 2, pp. A_297-A_304, 2022年2月.
- 6) 御所名航也, 吉田長裕: ビデオトラッキングデータを用いた信号交差点における複数自転車と左折車との選択的錯綜に関する分析, 第43回交通工学研究発表会論文集(研究論文), pp. 247-250, 2023年8月.
- 7) 小嶋文: 単路部で発生した事故に着目した道路上の走行位置別にみた自転車事故の特性分析, 第43回交通工学研究発表会論文集(研究論文), pp. 11-18, 2023年8月.
- 8) Koya GOSHONA, Nagahiro YOSHIDA: Analysis of Selective Conflicts between Multiple Bicycles and Left-Turning Vehicle at Signalized Intersections by using Video Tracking Data, 11th International Cycling Safety Conference, November 2023.
- 9) 小嶋文: 交通事故データを用いた自転車の重大事故の特性に関する研究, 土木学会, 第68回土木計画学研究発表会・講演集, 6 pages, 2023年11月.
- 10) 岡沢桜, 小林恵大, 櫻井淳, 松本修一, 吉田長裕, 山中英生: トンネル内の自転車追越し時における自動車走行特性, 土木学会, 第68回土木計画学研究発表会・講演集, 9 pages, 2023年11月.
- 11) 山田一太, 山中英生, 吉田長裕, 松本修一: 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直進自転車の安全性評価—交差点施策の効果について—, 土木学会, 第68回土木計画学研究発表会・講演集, 12 pages, 2023年11月.
- 12) 川合康央, 松本修一: ゲームエンジンを用いた協調型ドライビングシミュレータの開発, 土木学会, 第68回土木計画学研究発表会・講演集, 5 pages, 2023年11月.
- 13) 松本修一, 田口七菜, 若目田綾音, 海老澤綾一, 吉田長裕: 自転車シミュレータ実験による自転車専用信号の設置位置が自転車の停止判断挙動に及ぼす影響, 交通工学研究会, 交通工学論文集, Vol. 10, Issue 1, pp. A_309-A_315, 2024年2月.

5. 今後の展望

本研究の成果は、交差点設計などの関連するガイドラインや手引などに反映することを想定している。また、事故対策の立案過程において、どのような安全対策を組み合わせることで安全効果を期待出来るのかを仮想空間を使って説明する際にも活用されることが期待される。

6. 道路政策の質の向上への寄与

交通安全対策に関わる道路政策においては、主に対策を実際に導入する前に、詳細な事前検討を容易に行えることにつながることから、よりきめ細かな対策効果の実現と説明力向上を通じて、道路政策への質の向上に寄与することが期待される。

7. ホームページ等: なし

第1章 はじめに

1.1 背景

国内の自転車交通は、2007年の道路交通法改正に伴う歩道通行可能要件の明確化以降、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、同推進計画では都道府県に計画策定が義務づけられ、環境、健康、観光政策のもとで、広域エリアを対象に自転車ネットワーク計画が検討されている。

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、自転車関連事故率は先進国の中で依然として高く、歩行者とともに自転車の死者数が非常に多い。そのため、死傷者数半減目標のSDGs、第11次交通安全基本計画、多様な自転車やマイクロモビリティ等への対応も見据え、短距離の道路交通システムを持続可能な安全の方向へ導いていく必要がある。また、車道を基本とする自転車利用の浸透とネットワークの広域化に伴い、従来にない新たな事故形態が顕在化する恐れもあり、今後は諸外国で課題となっている自転車の新たな安全政策も参考にしながら、段階的に道路の安全を高めていく必要がある。

このように、より安全な自転車通行環境を創出していくためには、重大事故の発生を未然に防ぐための科学的知見に基づき、速度抑制や時空間分離等の利用者挙動を制御可能な事故対策メニューの充実に加え、設計段階からのプロアクティブな安全対策についても加速させていく必要がある。そのためには、世界の潮流であるセーフシステムの考え方にに基づき、交通参加者の通行速度や時空間、規制等の特徴を詳細に反映可能な仮想道路空間プラットフォームを構築し、衝突時の力学的な条件から逆算して道路交通システムの設計段階にフィードバックを行う科学的プロセスの確立が不可欠である。従来、交通安全の分析・評価では、衝突・回避挙動データ取得可能なドライブレコーダ（DR）、交通流再現のマイクロシミュレータ、自転車走行状態を取得するモバイルプロ

ーブ自転車（MPB）、自動車のVtoXや協調行動を再現できるドライビングシミュレータ（協調型DS）等は個別に研究開発されてきた。これらを自転車の課題に合わせてシステムを連携させることが、説明力の高い事故対策案の導出には必要である。

1.2 目的

以上を踏まえ、本研究では、車道上自転車と自動車の交通事故に着目し、とくに重大事故に至りやすい夜間や単路、坂道、大規模交差点等での交通コンフリクト状態を個別開発されてきたツールと連携し、サイクルシミュレータ（CS）上で再現・実験することにより、高い安全性を発揮できる事故対策案の提案と、道路交通システムの設計段階に反映すべき持続可能な安全を段階的に高める方策の提案を目的として、以下の5項目について研究を行う。

- 1) ドライブレコーダ、事故データ分析による車道上自転車事故の類型化と特性分析
- 2) モバイルプローブ自転車（MPB）を用いた自転車走行環境と利用者挙動との関連分析
- 3) 協調型ドライビングシミュレータ（DS）を使用した協調行動実験
- 4) 協調型サイクルシミュレータ（CCS）システムによる交通コンフリクト実験
- 5) 実験に基づいた車道上の自転車の安全改善策と持続可能な安全向上策の検討

第2章 ドライブレコーダ，事故データ分析による車道上自転車事故の類型化と特性分析

2.1 ドライブレコーダによる車道上自転車事故の類型化と特性分析

(1) はじめに

我が国における自転車事故は、2020年には67,673件発生し近年減少が続いているが、人身事故全体に占める割合は21.9%、死傷者のうち自転車乗用中であつた割合は17.8%を占め¹⁾いずれも増加傾向にあり、今後も効果的な安全施策の展開が求められる。2012年に国土交通省と警察庁により発出された「安全で快適な自転車利用環境創出ガイドライン」²⁾では、自転車対自動車の事故件数が減少傾向にある一方で、自転車対歩行者の事故件数がほぼ横ばいで推移していることを受け、歩行者と自転車の適切な分離のための通行空間整備形態の基本的な考え方が示され、2016年の改定ガイドライン³⁾では、自転車ネットワーク路線として指定された区間は、暫定形態としての整備も含め車道通行を基本としている。このような車道における自転車通行空間の整備ならびに自転車利用者への車道通行の指導が全国的に推進される中であつて、車道を通行する自転車と自動車の安全確保に関して課題の整理とその解決に向けた対策が必要となっている。

2019年における四輪車対自転車事故⁴⁾のうち、最も構成率の高い類型は出会い頭(53.4%)であるが、発生場所を信号交差点に限定すると、右左折時が75.2%でそのうち左折時が38.9%と最も占める割合が高い類型である。そのため、今後車道通行の自転車が増加することを踏まえるならば、信号交差点の設計・運用において、左折車との錯綜低減に関する視点がより重要となる。

車道における自転車と自動車の錯綜現象に関して、単路部については、自動車による追い越し例えば⁵⁾や自転車の路上駐車車両回避例えば⁶⁾などを対象とした分析事例が見られる。一方で、上述した左折車との錯綜については、国内外の交差点を対象に、現場におけるビデオ観測によって両者の挙動を分析したもの^{7),8)}があるが、国内における交差点の流入部での自転車と左折車の相互の影響を考慮しながら錯綜現

象を整理したものは見受けられない。

また、仮想空間における実験的なアプローチとして、協調型のドライビングシミュレータを活用して、様々なシナリオを設定して自転車と左折車の挙動や不安感を分析したもの⁹⁾がある。ここで、協調行動とは、自動車運転者と自転車運転者が互いにそれぞれの走行状態を把握し、それに基づいて運転行動の意思・行動を決定することを意味しており、互いの関係性から事故を防ぐ方法を検討するためには、この協調行動の詳細を明らかにすることが重要となる。

本節では、ドライブレコーダの記録データの活用により、左折車の運転者が急減速することで顕在化したヒヤリハットを対象に車道通行する自転車との錯綜の類型化を行い、交差点流入部における両者の影響関係について考察することを目的とする。

(2) データの概要と分析サンプルの抽出

車両に搭載されるドライブレコーダは、周囲の道路空間状況、運転者の運転行動、車両の挙動等がデータとして記録されるため、錯綜や事故の発生時の実際の当事者挙動や道路交通環境をより詳細に捉えるために有益な情報リソースとなる。本研究では、2016年から2019年の4年間に、東京都、静岡市、福岡市、由利本荘市、札幌市の各都市内を走行するタクシー車両に搭載されたドライブレコーダにより収集されたデータベースを用いた。ドライブレコーダでは、衝突や急ブレーキ、急ハンドル等により車体に0.45G以上の前後加速度が作用した場合にトリガーが発生し、事故やヒヤリハット等のイベント発生時およびその前10秒、後5秒の車内外映像、車速、加速度、ジャーク、緯度・経度、ブレーキ・ウインカー有無のデータが記録される。データベースのインターフェースにおける表示例を図-2.1に示す。

収集されたデータは、データベース構築者(東京農工大学スマートモビリティ研究拠点)において、目視によって基本データ(日時、場所等)、対象(人、自転車等)、タクシー状態(発進時、加速中等)等の項目によって分類され、データベース化される。ヒヤリハットレベルは表-2.1に示す基準により、高・

中・低・反応の4レベルで判定されている。

4年間で記録された全48,584件のイベントのうち、ヒヤリハット対象が自転車であるサンプル5,555件から、左折するタクシーと自転車の錯綜として860件が抽出された。さらに、ヒヤリハットレベルが「高」あるいは「中」であるものを対象として、個別の映像の確認によりタクシーと自転車が交差点の同じ車道流入部を通行している16件を選定した。

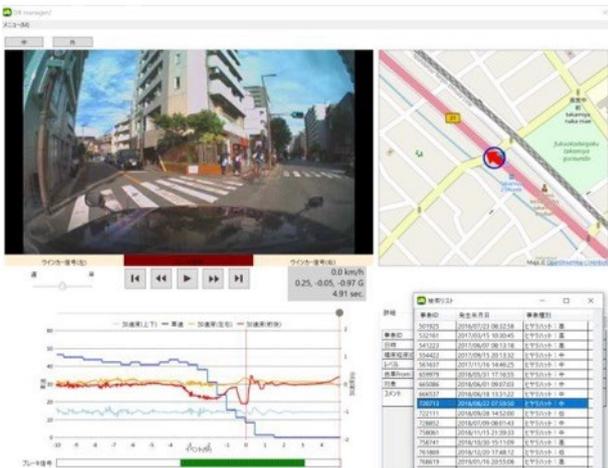


図-2.1 データベースのインターフェース

表-2.1 ヒヤリハットレベルの判定基準

ヒヤリハットレベル	基準
高レベル	事故寸前. 0.5秒ブレーキを踏むのが遅れていれば接触していた事例.
中レベル	1 ~ 2秒ブレーキを踏むのが遅れていれば, 事故になっていたであろう事例.
低レベル	相手の危険に気づき急ブレーキした場合. 反応よりやや危険だが, まだ余裕がある.
反応レベル	急ブレーキをかけなくても事故には至らなかったであろう事例.

(3) 直進自転車と左折車のヒヤリハットの類型化

本稿では、交差点の車道流入部における直進自転車と左折車の錯綜を類型化する基本的な視点として、ヒヤリハット当事者である両者の走行挙動、相対的な位置関係に着目する。本研究全体の流れとして、a)当事者相互の挙動の関係を基本とした類型化を行い、それぞれの意思決定のプロセスを明確にした上で、b)ケースごとに道路条件、交通条件による運転挙動への影響を検討することにより、c)事故抑止のための対策の提言へ帰結させることを目標としている。この中で本稿はa)の段階に位置づけられるもので、当事者の相互作用による挙動関係に着目した基本的な類型化を行う。

ヒヤリハット発生前までの左折車・自転車の挙動や両者の位置関係などから、ヒヤリハットの発生形態として以下の4つのケースに類型化された。

①交差点内で停止、徐行している左折車に自転車が

後方より接近するケース (10件)

このケースは、a)左折車が交差点隅角部前に位置し、車体の向きと流入部長手方向の角度が一定程度ある状態に対して、自転車が左折車と歩道との空間を通行しようとする場合 (図-2.2, 6件) と、b)左折車が隅角部よりも上流側に位置し、車体の向きが流入部長手方向とほぼ平行の状態に対して、自転車が左折車側方をすり抜ける場合 (図-2.3, 4件) に分けられた。

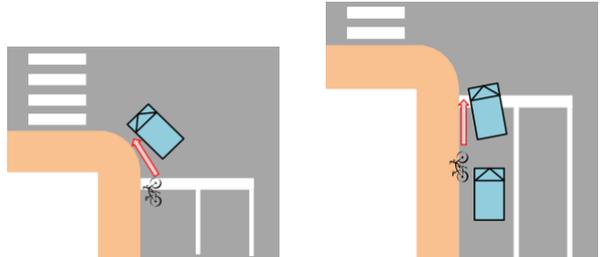


図-2.2 錯綜パターン①-a 図-2.3 錯綜パターン①-b

②流入部で減速する左折車に自転車が後方より接近するケース (5件)

このケースは、左折車が流入部で減速することで後方の自転車が追いつき、自転車が左折車の死角に入った状態で左折車運転者がハンドルを切ってヒヤリハットが発生するもの (図-2.4) で、車内カメラ例として示した図-2.5のように左折車の左後方で自転車がほぼ同じ速度で並進する状況が典型的であった。

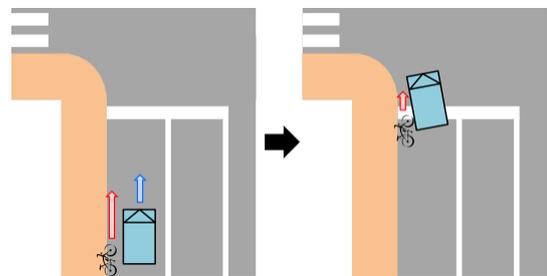


図-2.4 錯綜パターン②

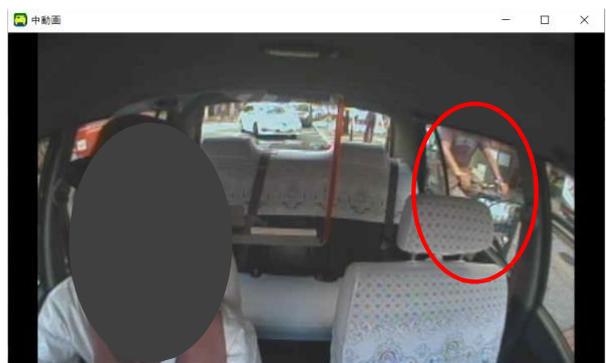


図-2.5 左折車の左後方で自転車が並進する典型例 (車内カメラ)

③左折車が自転車を追い越した後、減速することで自転車が接近するケース (1件)

このケースは、交差点上流部で左折車が自転車を

いったん追い越し、その後流入部において左折車が減速することによって直進自転車が追いつくものの、左折車が左折を開始しようとするために錯綜が発生するもの(図-2.6)である。ヒヤリハットの発生直前の状況は②と似ているが、流入部前後で互いの位置関係が入れ替わる点において現象が異なる。

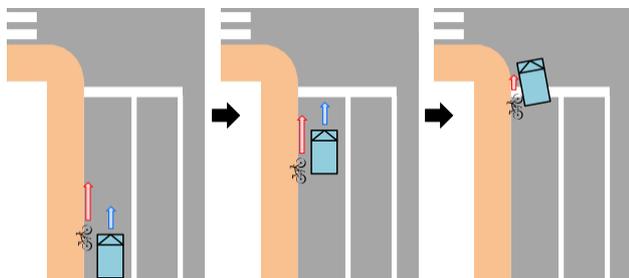


図-2.6 錯綜パターン③

(4) 状況別の事故発生要因の仮説

車内外カメラの映像に記録された自転車の挙動、左折車運転者の安全確認状況、当事者以外の交通主体の存在、周囲の道路交通環境状況や、左折車運転者のウインカー・ブレーキの操作状況に基づき、前章にて類型化されたヒヤリハットの発生ケース別に、自転車運転者ならびに自動車運転者の認知から判断、行動までの過程において想定される事故発生要因について、以下のように仮説を整理した。

① 交差点内で停止、徐行している左折車に自転車が後方より接近するケース

a) 左折車が交差点隅角部前に位置する場合

後方から接近する自転車運転者は、自動車の位置と向きの状態から明らかに左折車であることを認識しているが、リスクテイキング傾向あるいは自身の主観的な優先意識が高く隅角部と自動車の間の空間に入り込む。この状況に対して左折車運転者には錯綜回避のための安全確認が求められるが、車体の位置や向きの関係から隅角部や流入部方向への目視には身体の大きな動きが必要で、確認不足が誘発されやすいと考えられる。隅角部付近の左折車の位置や向きは、隅切半径、横断歩道の取り付け位置、路肩幅員といった道路の物理的条件に大きく依存する。そのため、左折車に後方から接近する自転車の不安全挙動の形態やその発生確率も同様に、道路の物理的条件によって変化することが考えられ、その関連性を解き明かすことが重要である。

b) 左折車が隅角部よりも上流側に位置する場合

自動車の向きが流入部長手方向とほぼ平行であることから、後方から接近する自転車運転者は、a)とは異なりウインカーのみが左折車であることを認識する手がかりとなる。そのため、左折車運転者の合図不履行や自転車運転者のウインカーに対する認知エラーによって、自動車が直進車であると誤認して錯綜に至る可能性がある。一方、a)と同様に左折車と認識しながらもリスクテイキング傾向の高い挙動を示

すケースも考えられる。左折車運転者については、左後方への安全確認不足が想定されるが、単純な確認不足のほかに、左前方の横断歩行者、自転車のような第三者の存在による注意の分散も大きな要因として挙げられる。左後方の自転車の前を先行するもう一台の自転車に注意が偏り、後方の自転車と錯綜を起こすようなパターンも考えられる。

② 流入部で減速する左折車に自転車が後方より接近するケース

自動車が減速する際、自転車が後方にいる時点でウインカーによる合図が履行されれば、自転車運転者は左折車であると認識できる。しかし自転車が追いつき自動車左後方で並進状態となつてから合図が出されると、車体の左前方側面のウインカーランプで左折車であることを知る必要があり、自転車運転者の認知エラーが生じる可能性が高まる。このように左折車運転者のウインカーによる合図のタイミングが大きく影響する可能性がある。左折車運転者の安全確認不足については①b)と同様であるが、減速に続く左折行動であるため、停止や徐行の場合と比べて自転車を確認するタスクの負荷はより高いと考えられる。

③ 左折車が自転車を追い越した後、減速することで自転車が接近するケース

交差点から比較的近い流入部において自動車が自転車を追い越し、減速してから左折に至るケースで、②よりも左折行動までの減速度が大きく左折車運転者の不安全行動が主たる要因となる。追い越し時に自転車を認知できているため、左折車運転者のリスクテイキング傾向の高い場合や急ぎや焦りによる判断エラーにより誘発される。このケースは、前章で分析対象となったタクシーでは1件と事例数が少ないが、よりエラーの生じやすい一般ドライバーであれば、このような左折車の挙動が発生する可能性は十分に考えられる。自転車運転者による左折車認識ならびに挙動のメカニズムについては①、②と同様である。

(5) ドライブレコーダデータを用いたヒヤリハット現象と重大事故との関連分析の概要

自転車の重大事故に係るヒヤリハット現象の特性を考察するにあたり、念頭とする重大事故の類型を定めるため、マクロ事故データから重大事故の発生状況を概観した。用いるデータは、公益財団法人交通事故総合分析センターから提供されている「SIP事故パターン」のデータとした。これは、内閣府が平成26年度から平成30年度に展開した「戦略的イノベーション創造プログラム」の一環として実施された、「交通事故死者数低減効果見直し解析手法に係る調査」において、死者が発生している事故類型についてパターン整理されたものである。令和元年度以降は、公益財団法人交通事故総合分析センター独自の継続事業として事故パターン別の発生状況が取りま

とめられている。本研究ではSIP事故パターンの対象類型を重大事故とみなして特性を捉えることで、ヒヤリハット分析の対象とする自転車関連の重大事故類型を選定することとした。

SIP事故パターンの設定にあたっては、平成25年から平成29年までの死者数の推移を踏まえながら、5年平均で3人以上の死者となるような組み合わせを抽出しパターン化されている。さらに5年平均死者数が3人に満たなくても増加傾向にあるとみられるパターンが追加され、合計210パターンが設定されており、全交通事故死者数の80.7%をカバーしている。

(6) 自転車事故に関する事故パターンの特性

SIP事故パターンのうち当事者が自転車である各パターンについて、平成30年と令和元年の事故件数と死者数を図-2.7に示す。アルファベットと数字で構成される表記は、事故パターンの内容を表しており、本節で参照するパターンのみを図-2.8のイラストで記載している。なお、このイラストにおいて、自転車は通行方向の違いを表しているものであり、右側/左側通行や車道/歩道/路側帯通行といった、詳細な通行位置についてはすべてが混在している。

事故件数が多い2パターン（PCB-CR12-DS3、PCB-CR12-DS4）は、いずれも無信号交差点での出会い頭事故で、両者の違いは自動車から見た自転車の出現方向である。左から自転車が出現する方が事故件数が多いが、死者数は右から出現する方が多い。いずれも1年で事故件数は減っているが死者数は増加している。

次に事故件数が多いのは、左折車と自転車が同方向に信号交差点へ進入するパターン（PCB-TL11-TL1）で、死者数は平成30年には出会い頭の右出現と同程度であったが、令和元年には減少している。しかし他のパターンと比べて依然と死者数は多い。

続いてグラフ内左上にプロットされている、事故件数が比較的少ないにもかかわらず、死者数が多い2パターンが存在しており、いずれも単路での事故で、追突（PCB-RE23-DS1）と、自転車単独の路外逸脱（PBS-RF23-DS0）である。追突は平成30年と令和元年で事故件数、死者数ともにほぼ増減がなく、単路路外逸脱は令和元年において前年と比べて死者数が大きく増加していることがわかる。これらは事故件数に対する死亡率が他と比べて非常に高く、実態の把握と安全対策を早急に検討すべき重大事故であるといえる。

(7) 自転車事故に関する追突事故パターン

自転車への追突ヒヤリハットの特徴として、①自転車運転者の行動に問題があるケース、②自動車運転者の認知に問題があるケース、③自動車運転者の判断に問題があるケースの3つに大きく分類された。

① 自転車運転者の行動に問題があるケース

自転車が自動車の直前で進路変更をすることで自動車運転者が急減速または急ハンドルによって回避が強いられるケースである。その典型として、歩道

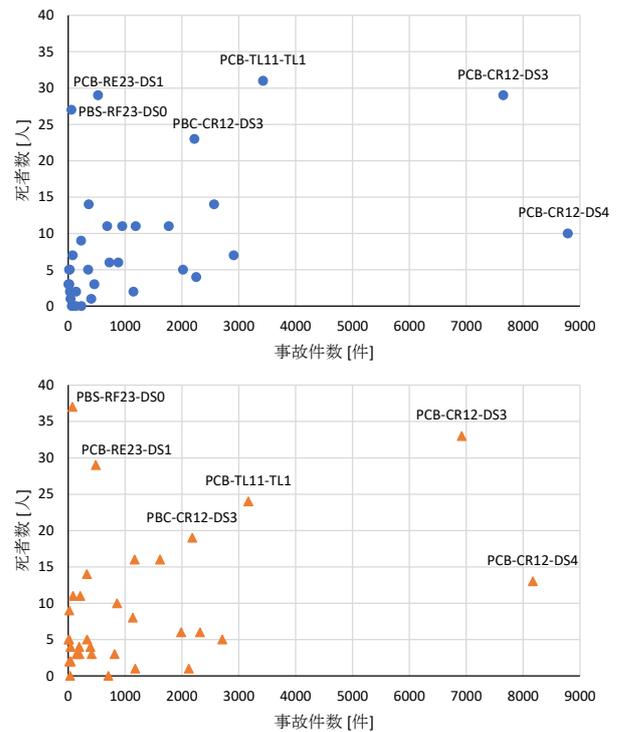


図-2.7 自転車事故パターン別の事故件数と死者数（上：平成30年，下：令和元年）

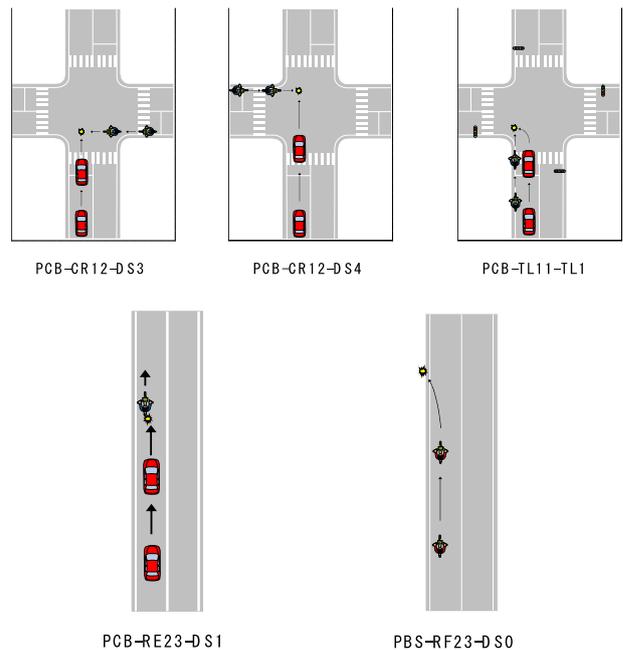


図-2.8 自転車事故パターンの内容

通行の自転車が車道へ遷移する場合と、車道通行の自転車が斜め横断を開始したり過度にふらつく場合が確認された。いずれも自転車運転者は後方の確認をしておらず手信号などの合図もなく、後方の自動車からは突如自車の直前に自転車が現れる状況であり、自転車運転者側の行動に問題があるといえる。

歩道から車道への遷移では、歩道上の自転車進行方向の先に他の歩行者などの通行障害となる原因がある場合とない場合とが混在するが、車道通行から

の進路変更の際は車道上に路上駐車車両などの障害要因は存在しない状況のみであり、自動車運転者が危険予測をすることは非常に困難なケースである。

②自動車運転者の認知に問題があるケース

自動車運転者が前方の車道上を通行する自転車の存在を認知せずに接近し、回避行動が強いられるもので、自転車側の行動には問題がないケースである。夜間や雨天時で自転車に対する視認性が乏しい環境で発生しやすい。特にワイパーを使用せずにフロントガラスに水滴が付着した状態で走行したために認知が遅れており、急減速トリガーの1.7秒前のワイパー操作で前方の自転車に気づいた状況である。

③自動車運転者の判断に問題があるケース

自動車運転者の状況判断に起因する錯綜事象は、さらに、a)自転車との相対速度に対する判断ミスと、b)余剰有効幅員に対する判断ミスに分類された。

a)自転車との相対速度に対する判断ミスでは、自転車が危険回避や登坂によって速度が低下した場合に、相対速度の変化に十分に対応できずに錯綜に至る状況が確認された。例えば、左側への車線変更のために減速した前方のバスを回避しようと自転車が減速したが、自動車運転者がその相対速度の変化に対応できず追突型のヒヤリハットに至る事例である。また、橋の端部などに向かう坂道を上ることで自転車の速度が低下する状況への判断ミスに起因するケースも見受けられた。

b)余剰有効幅員に対する判断ミスでは、まず第三者の交通主体の存在はなく、道路条件のみで決まる有効幅員に対して判断を誤るケースが確認された。例えば、高架下のトンネルへ自転車に追従しながら進入する事例であるが、先の単路における有効幅員に対する判断を誤り、この後に自転車を追い抜こうとして追突の錯綜が生じているものである。また、第三者の交通主体の存在によって有効幅員が動的に変化する状況に対して判断エラーを起こすケースが存在した。また、隣接車線の前方あるいは後方に第三者の車両が存在し、周囲との相対速度と位置関係の予測が不十分なために判断エラーが生じ、急ブレーキに至る事例が多く確認された。他には、路上駐車車両を回避するために自転車が進路変更する場合に、変化する余剰有効幅員に対する見積りが十分でない事例もあり、第三者（路上駐車）の存在が錯綜現象の発生メカニズムに影響を及ぼすことがわかる。

(6) まとめと今後の課題

本稿では、信号交差点における車道通行の自転車と左折車の錯綜現象について、ドライブレコーダに記録されるデータの分析により類型化を行い、事故発生の要因について仮説を整理した。左折するタクシーの運転者が自転車との衝突回避のために急減速することで顕在化したヒヤリハット事象を抽出したところ、①交差点内で停止、徐行している左折車に自転車が後方より接近するケース、②流入部で減速する左折車に自転車が後方より接近するケース、③左折車が自転車を追い越した後、減速することで自

転車が接近するケースに大きく分類され、①については左折車の位置関係により、a)左折車が交差点隅角部前に位置する場合と b)左折車が隅角部よりも上流側に位置する場合に分けられることが示された。また、類型化された錯綜パターンごとに発生要因を考察したところ、自転車側の要因としてリスクテイキング傾向や主観的な優先意識が高いことによるものや、ウインカーに対する認知エラーといった不安全な行動が想定された。左折車側の要因としては、基本的な安全確認不足に加えて合図不履行や余裕のない左折準備行動と、それらを誘発する道路交通環境（他の横断者の存在等）、両者の位置関係による要因が指摘された。さらに、導かれた発生要因を踏まえて、自転車運転者と左折車運転者の意思決定プロセスと相互作用について整理することにより、協調行動に関わる実験への展開を想定した行動シナリオの作成可能性が示唆された。

今後はさらに分析サンプルを増やしながら、類型化された錯綜パターンの特性についてより詳細に把握するとともに、速度や通行位置といった当事者の挙動に関する定量的な分析や、道路線形や交通制御、横断歩行者等の他の交通主体の存在といった道路交通環境の条件による影響について検討することで左折事故抑止に向けた知見を見出すことが求められる。

2.2 事故データによる車道上自転車事故の類型化と特性分析

(1) はじめに

マクロデータを用いて、自転車の重大事故の特性を分析することを目的とし、自動車と自転車の事故について、表-2.2の抽出条件を基本として、その他の条件を加えて全国版の交通事故データ分析を行った。全国版データの集計は公益財団法人交通事故総合分析センター（ITARDA）に依頼した。集計結果の中の「重大事故」の記載は、「死亡事故と重傷事故を合わせた件数や割合を示す際に用いている。本研究では、自動車と自転車の動きが様々に組み合わせり複雑となる、交差点における事故に着目して分析を行った。

表-2.2 分析に利用した交通事故データの抽出条件

No.	条件	備考
抽出条件 1	第 1 当事者の当事者種別が「貨物車」または「乗用車」	
抽出条件 2	第 2 当事者の当事者種別が「自転車」	
抽出条件 3	2017 年 1 月～2020 年 12 月に計上された事故	事故原票の項目の統一性のため、2017 年以降の事故に限定した。
抽出条件 4	交差点での事故について、「点灯（三灯式）」または「施設なし」	信号交差点と無信号交差点における事故の特性を検討するため、一灯式信号等その他の交差点を除き、三灯式と無信号の交差点に限定した。

自動車と自転車の進行方向について、交通事故

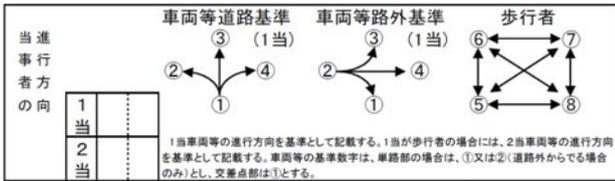


図-2.9 当事者の進行方向 (出典：公益財団法人交通事故総合分析センター)

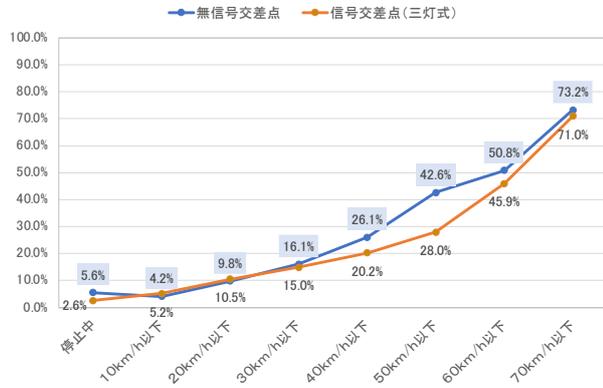


図-2.10 第一当事者が直進 (1→3) の場合の危険認知速度別に見た重大事故の割合



図-2.11 事故類型別に見た重大事故率 (信号交差点・三灯式)

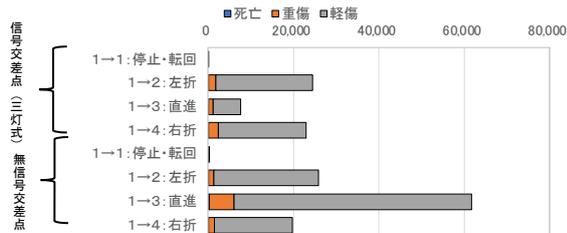


図-2.12 自動車の進行方向別に見た事故内容別件数

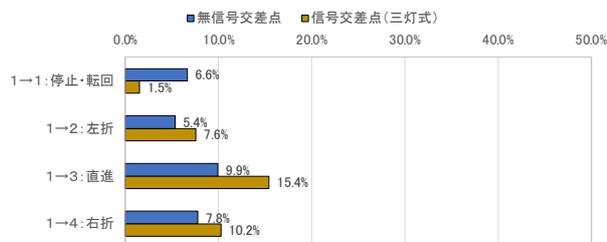


図-2.13 自動車の進行方向別に見た重大事故割合

原票の項目において当事者の進行方向は①～④の数字の組み合わせで示され、例えば直進は1→3、右折

は1→4、左折は1→2と表される (図-2.9)。

(2) 交差点における重大事故の特性

事故の重大性に関わる要因として自動車の速度の影響について検討するため、自動車の危険認知速度別に重大事故の割合を見ていく。自動車の進行方向別に事故の形態が違うことが考えられるため、自動車の進行方向を直進 (1→3)、左折 (1→2)、右折 (1→4) に分けて集計した。図-2.10は直進自動車について集計した結果を無信号交差点と信号交差点 (三灯式) に分けて示したものである。無信号交差点、信号交差点とも、危険認知速度が速くなると重大事故の割合が大きくなっていることが分かる。時速30km/hを超えた速度からは、無信号交差点における事故の方が、信号交差点よりも重大事故率が高い傾向がみられる。今後、道路環境や第二当事者の進行方向など、より具体的な事故状況を確認することで、この違いの要因について検証する必要があると考えられる。

(3) 事故類型別に見た危険速度別重大事故

図-2.11は信号交差点について、事故類型別に件数と重大事故率を示したものである。信号交差点で発生している事故については、自動車の左折時の事故と右折時の事故が多く、左折時と右折時を比較すると重大事故率は右折時の方が高くなっている。次に件数が多いのが出会い頭事故であり、右左折時の事故より重大事故率が高くなっている。もっとも重大事故率が高いのは「追突-進行中」であった。

無信号交差点では事故類型別の事故件数の傾向は信号交差点と異なり、出会い頭事故が顕著に大きくなっている。同じ出会い頭事故でも、重大事故率については信号交差点よりも小さくなっている。「追突-進行中」の事故類型でもっとも重大事故率が高くなっているのは、信号交差点と同じ傾向であった。

(4) 自動車進行方向別に見た重大事故

図-2.12は自動車の進行方向別に見た事故件数であり、図-2.13は進行方向別に見た重大事故割合を示している。信号交差点については右左折自動車の事故が多くなっている。重大事故の割合については、直進自動車でもっとも割合が高くなっている。

(5) 自転車の年代別に見た重大事故

図-2.14は自転車の年代を非高齢者 (64歳以下)、前期高齢者 (65～74歳)、後期高齢者 (75歳以上) に分けたうえで、信号交差点と無信号交差点別に、自動車の進行方向別に重大事故の割合を集計した結果である。信号交差点、無信号交差点とも、非高齢者よりも前期高齢者の場合に、また前期高齢者よりも後期高齢者の場合に、重大事故の割合が高い。

(6) 自動車形状別に見た重大事故

図-2.15は、自動車の形状別の事故件数と重大事故率を示している。件数としては「乗用車-セダン」

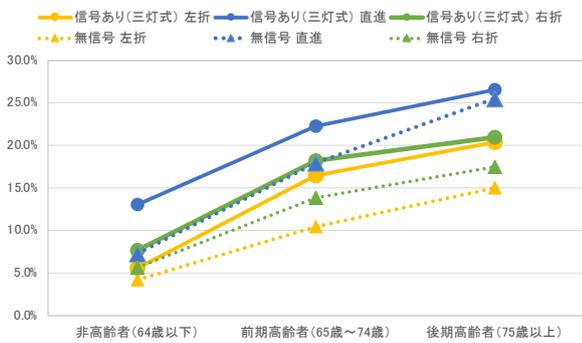


図-2.14 自転車の年代別、自動車進行方向別みた重大事故割合



図-2.15 車両形状別みた事故件数と重大事故割合



図-2.16 昼夜別みた事故件数と重大事故割合 (信号交差点)

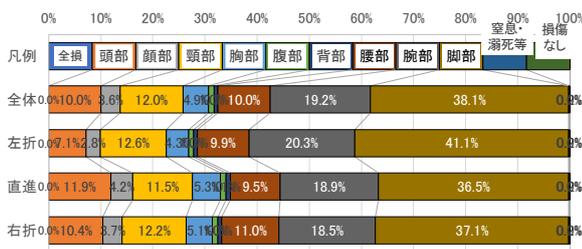


図-2.17 自動車進行方向別みた自転車の損傷部位

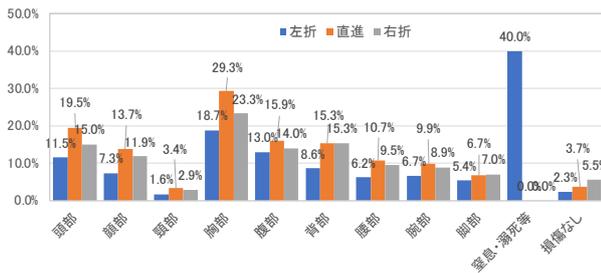


図-2.18 自動車進行方向別、自転車の損傷部位別みた重大事故割合

が顕著に大きく、重大事故も8.3%起きている。一方、その他のセダンよりも大型の車両形状では、重大事故となる割合が大きくなっている。

(7) 事故発生時間帯別にみた重大事故

図-2.16は昼夜別にみた信号交差点における事故件数と重大事故率である。昼の時間帯の件数が多く、次に夜の件数が多い。重大事故率については、夜の明け方に高くなっている。

(8) 自転車の損傷部位別にみた重大事故

図-2.17は、自動車の進行方向別に、自転車に乗っていた人がどこを損傷したのか損傷部位の割合を集計したものであり、図-2.18は自動車の進行方向別、自転車の損傷部位別に重大事故割合を集計したものである。いずれの自動車の進行方向でも、自転車の損傷部位としては脚部の割合が大きく、次に腕部の割合が大きい。直進の場合に、頭部の損傷の割合が大きい傾向がみられる。重大事故の割合が大きいのは、損傷部位が胸部の場合に次いで頭部の場合と腹部の場合となっており、いずれも自動車が直進、右折、左折の順に重大事故の割合が大きくなっている。

(9) 事故データの分析に関するまとめ

本節では、交差点における自動車と自転車の事故について、第一当事者が自動車、第二当事者が自転車の組み合わせとして無信号交差点と信号交差点(三灯式)に限定したうえで、全国の交通事故のデータを利用して重大事故の特徴について分析した。自動車の速度と重大事故の関係について検討するため、自動車の速度を反映していると考えられる危険認知速度に着目した分析からは、危険認知速度が大きくなると重大事故の割合が増加する傾向がみられるとともに、同じ危険認知速度であっても直進車の場合には40km/h以下、50km/h以下の場合に無信号交差点で重大事故率が高い傾向が見られ、その要因についてさらなる検証が必要である。自動車と自転車の進行方向別の検討からは、信号交差点、無信号交差点についてそれぞれ、重大事故の件数が多い形態、及び重大事故の割合が大きい事故の形態が見られた。

自転車の年代別の分析からは、高齢者、特に後期高齢者の場合に重大事故率が高くなることが示され、高齢者が関係する事故の対策の必要性が改めて見られた。自転車の損傷部位に関しては胸部、頭部を損傷している場合に重大事故の割合が高く、事故の形態との関係について検証が必要であると考えられる。

これらの結果から、信号交差点では、自動車左折時の事故が最も多いと同時に、重大事故の数も最も多くなっており、優先して事故対策が必要な事故形態であることが示された。中でも、自転車が自動車と同じ方向から来て直進する組み合わせの事故件数が最も多く、重大事故の数も左折自動車と自転車の進行方向の各組み合わせの中で最も多くなっている。どのような状況で事故が発生しているのか、シミュレーション実験を実施する上で、シナリオを作成す

るための重大事故の特性の検討につながる結果を得るとともに、対策の方向性を検討する基礎的な知見が得られたと考えられる。

参考文献

- 1) 令和2年中の交通事故の発生状況, 警察庁交通局, 2021.
- 2) 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, 2012.
- 3) 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, 2016.
- 4) 一般社団法人交通工学研究会: 改訂 平面交差の計画と設計 自転車通行を考慮した交差点設計の手引, 2020.
- 5) 川井涼太, 金利昭: 車道通行自転車の進路変更時における交通規則の遵守実態と安全挙動分析, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol.74, No.5 (土木計画学研究・論文集第 35 巻), pp.I_1091-I_1100, 2018.
- 6) 原澤拓也, 山中英生, 西本拓弥: 追越挙動に基づく車道部自転車通行空間の安全感評価モデルの開発, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.72, No.5 (土木計画学研究・論文集第 33 巻), pp.I_845-I_852, 2016.
- 7) 鈴木弘司, 志村連: 大規模交差点における自転車と右左折車の挙動と交錯危険性に関する分析, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol.74, No.5(土木計画学研究・論文集第 35 巻), I_971-I_980, 2018.
- 8) 石見拓也, 吉田長裕: 車道上自転車通行帯を有する信号交差点における自転車と左折車の錯綜分析, 土木計画学研究・講演集, Vol.41, 4pp., 2010.
- 9) 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 D3 (土木計画学), Vol.73, No.5 (土木計画学研究・論文集第 34 巻), I_717-I_722, 2017.

2.3 大規模信号交差点における利用者挙動のビデオ観測調査

(1) はじめに

信号交差点における直進自転車と左折車の事故は、重大事故の典型的なパターンの一つである¹⁾。自転車通行空間の種類には、自転車道や自転車専用通行帯、車道混在、自歩道などがあり、信号交差点に接続された通行空間の特徴と自転車及び左折車挙動との相互作用により、危険な錯綜に至ることがある。こういった事故発生メカニズムをよりよく理解し、自転車・自動車の危険な錯綜状況を防ぐことのできるプロテクテッド型交差点²⁾の要素の導入を検討するためには、自転車と左折車の運転挙動に着目し、先進安心自動車の普及期にも対応できるように、より安全な交差点隅角部の設計要件を明らかにする必要がある。

自転車事故の多くは、自動車ドライバーによる認知の誤りと関係していると考えられており、「選択的認知」や「非注意性盲目」に関する先行研究がある³⁾⁴⁾。これらの研究は、錯綜対象の見落としに着目した内容であることから、自動車ドライバーの観点からは、信号交差点における複数の交通錯綜対象の選択が生じていると考えられる。既往研究では、1対1の直進

自転車と左折車の交通錯綜条件を対象としたが、より複雑な交通錯綜状況を扱う研究はほとんど行われていない。

また、プロテクテッド型交差点では、四隅に設置された縁石により必然的に停止線がオフセットされているが、これにより自動車・自転車間の優先権や錯綜地点が明確になるかどうかは明らかになっていない。

そこで、本研究では、自転車・自動車の交差点流入条件の異なる信号交差点において、自転車と左折車の交通錯綜現象をビデオ観測し、その特徴を分析することで、自転車通行の安全に資する交差点隅角部の設計に関する基礎的知見を得ることを目的とした。具体的には、撮影ビデオから、左折車と単独/複数台を含む自転車との交通錯綜現象について、深層学習を使ったビデオ解析モデルにより走行軌跡を抽出し、その走行軌跡から衝突余裕時間指標⁵⁾を使って錯綜パターン毎の安全性を比較するとともに、ベイズ回帰モデルにより左折車の車両挙動の特徴を明らかにすることとした。

(2) 調査分析方法

a) 対象交差点の概要

本研究では、自転車インフラの整備形態、自転車の走行挙動、左折車の走行挙動の関連性について分析を行うため、整備形態の異なる4つの交差点を調査対象とした(表-2.3)。交差点の選定では、自転車通行環境の整備が進んでいる東京都内の大規模な信号交差点を対象とした。2020年度に撮影を行った亀戸、富ヶ谷交差点は、ビデオ撮影により交差点の自転車・左折車の挙動を分析するため、比較的高さのある位置からの撮影が行えるよう、交差点の付近に歩道橋等の構造物があることも考慮して選定した。2021年度撮影した板橋、熊野町交差点は、歩道橋の

表-2.3 観測交差点の概要

対象交差点	構造的分離		車道混在	
	亀戸	富ヶ谷	板橋	熊野町
整備・運用形態	自転車道+自転車横断帯	自歩道+自転車横断帯	自歩道+横断歩道	自歩道+横断歩道
第1車線	左直	左直	左直	左折専用
隅切半径	12.0m	11.0m	7.0m	9.0m
停止線セットバック	9.0m	11.0m	19.0m	10.0m
自転車セットバック	5.5m	4.0m	1.0m	3.0m
交差角	90°	85°	100°	85°

有無に関わらず、東京都内における交通人身事故発生件数が多かったことから選定した。撮影時間帯は、自転車の交通量を考慮し、朝は通勤ピーク時間帯である7時～9時付近で、夜は日の入り後30分程度経過した時間帯とした。

b) 錯綜の定義と分析対象

本研究において、錯綜の定義は「減速やハンドル操作がない場合に衝突の恐れがあり、回避行動をとったもの」とした。衝突被害軽減ブレーキの国際基準では、ドライバがブレーキを操作しなくてもシステムが自動でブレーキをかけるタイミング、すなわち緊急とみなすタイミングとして、TTCの値が3秒以下になった時と定めている⁶⁾。そこで本研究では、TTCが3秒以下となる自転車が現れた時間を錯綜開始時間とし、TTCが4秒以内の他の自転車も分析対象とする。

c) 自転車通行パターンの分類

自転車が交差点に進入する方法は、自転車インフラの整備形態によっても異なることから、A1、A2、A3、A4、B1、B2、C1、C2、Dの9パターンに分類した(図-2.19)。頭文字のAは順走自転車、Bは横断方向から進入する自転車、Cは対面から来る自転車、Dは隅角部に静止している自転車を表す。また、隅角部に停止した自転車をパターンDとする。各交差点でA1～Dのいずれか、あるいは複数のパターンに該当する自転車走行挙動が観測された。

d) 動画解析と評価手法

2020年10月～2021年11月に各交差点において約3時間ずつビデオ観測調査を行った。ビデオの解像度4Kは、水平3840×垂直2160画素となっている。解析手法は、撮影したビデオからオブジェクトの種類と座標をカルマンフィルタを用いてトラッキングできるDEEPSORTを用いた。

物体検知の出力結果として、静止画ごとに、自転車や自動車、人などをクラス(class)として分類したクラスデータと、静止画左上からのピクセルによる検知物体の上下左右の座標データを取得できる。使用した座標は、自動車と自転車共にy軸については地面との接地点である下端(by)とした。自動車のx軸は、自転車に近い方(歩道側)の座標を用い、自転車のx軸は、車輪の位置として右辺と左辺の midpoint とした。また、オブジェクトトラッキングの際、物体誤検知により座標が適切に取得できていない場合があったため、座標データに対して欠損値の補間および平滑化処理を行った。

錯綜の危険性は、TTC (Time to Collision) 指標で評価した。TTCとは、速度と進行方向を維持すると仮定した場合の衝突までの時間(s)で定義される。本研究では、潜在的な衝突点を逐次計算し、その点までの距離を速度で割った2次元TTC(ベクトル型)指標を使用した。本研究においては車両の大きさ等を考慮しない座標(点)データによって算出を行う。

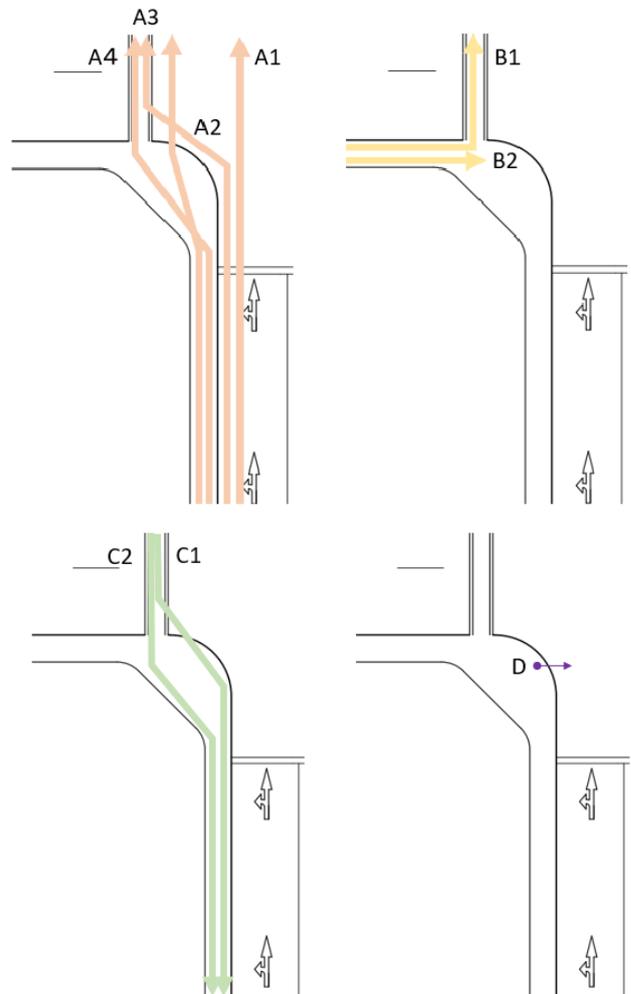


図-2.19 自転車通行パターン (9種類)

簡易的な算出方法として、逐一算出される交点までの自転車・左折車の到達時間のうち最大のものを2次元TTC(ベクトル型)の値として用いるものと定義した。

e) 統計モデリング手法

錯綜自転車やその他の変数が左折車の挙動に与える影響を少ない観測数でも明らかにするため、事前分布と尤度関数から乱数を生成し、事後分布を近似するベイズ回帰モデル(Bayesian Regression Model: BRM)⁷⁾⁸⁾を用いて、左折車の進入速度と進入時の縁石からの通行位置を分析した。BRMは、マルコフ連鎖モンテカルロサンプリング(MCMC)法を用いることで、特定のパラメータ内のモデルの事後密度を近似し、パラメータ推定値の不確実性を確率分布として推定することができる。デフォルトのMCMCサンプラーを使用し、4つの連鎖をそれぞれ15,000回繰り返す、そのうち最初の5,000回はサンプラーのウォームアップに使用し、その後は破棄した。MCMCサンプラーが収束していることは、収束が良好であることを示す潜在縮尺統計量Rhatが1.00となっていることから確認できた。考察では、パラメータの特徴から、左折車ドライバの運転行動に関するばらつきが大きくなる条件を特定する。

(3) 観測結果

a) 各交差点の観測結果

表-2.4 は各交差点の観測結果である。錯綜自転車台数は亀戸交差点で最も多くなっている。また、左折車台数は亀戸交差点、板橋交差点で多くなっている。自転車通行パターンに着目すると、亀戸交差点、板橋交差点、熊野町交差点では、自転車道（歩道）から横断帯や横断歩道に接続するパターン A4 がよく見られた。亀戸交差点ではショートカットして交差点に進入するパターン A3 が、富ヶ谷交差点では車道を直進するパターン A1 が他交差点に比べて多く見られた。

b) 自転車の走行軌跡

観測された自転車の走行軌跡を交差点別に重ね合わせたものを図-2.20 に示す。ここで、撮影方法により画角に違いがあるため、座標取得の範囲が異なっている。パターン A は橙色、パターン B は赤色、パターン C は緑色で示している。

自転車道（歩道）から横断帯や横断歩道に接続するパターン A4 の軌跡を比較すると、亀戸、富ヶ谷、熊野町交差点では隅角部から横断部にかけてシフトする形で走行しているが、板橋交差点では隅角部から横断部までが直線的な接続となっている。これは板橋交差点の自転車道のセットバック量が小さいことによるもので、自転車の速度上昇につながるものが予想される。

次に、順走自転車に着目すると、板橋、熊野町交差点では自転車走行パターンのほとんどがパターン A4 であるのに対して、亀戸、富ヶ谷交差点ではパターン A1 からパターン A4 まで様々な通行パターンが確認できる。特に、亀戸交差点では交差点にショートカットして進入するパターン A3 が、富ヶ谷交差点では車道上を直進するパターン A1 が多く見られ、交差点構造によるものであると考えられる。

左折車ドライバーの観点から、ショートカットして交差点に進入する自転車との錯綜は、潜在的な衝突点を予測することが困難であり、パターン A3 による危険な錯綜も多く見られた。その他、整備形態や隅切半径など交差点条件の違いが、自転車走行挙動に関係していると考えられる。

c) 左折車の走行軌跡

観測された左折車の走行軌跡を交差点別に重ね合わせたものを図-2.21 に示す。ここで、撮影方法により画角に違いがあるため、座標取得の範囲が異なっている。

交差点毎の特徴を比較すると、横断帯や横断歩道に接続するときの左折車の角度が異なり、亀戸交差点では横断帯にほぼ正対しているのに対して、板橋交差点では急な角度で横断歩道に進入している。これは、自転車道セットバック量や交差角によるものであると考えられ、セットバック量が小さくなるにつれて、交差角が鈍角になるにつれて左折車は急な

表-2.4 各交差点観測結果

交差点	動画時間 (分)	左折車 台数	錯綜 件数	錯綜自転車			
				A	B	C	計
亀戸	120	288	32	40	7	7	54
富ヶ谷	147	117	12	18	2	0	20
板橋	178	483	22	26	3	5	34
熊野町	180	176	17	19	5	1	25
計	625	1,064	83	103	17	13	133

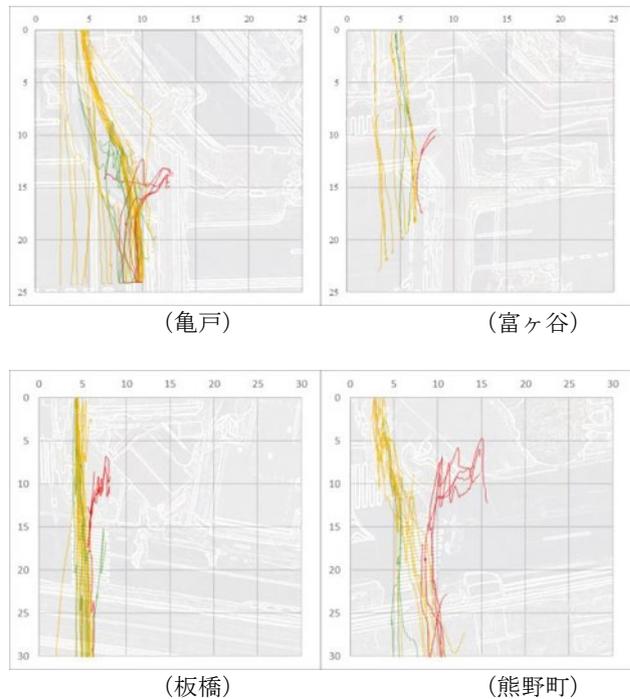


図-2.20 自転車の走行軌跡

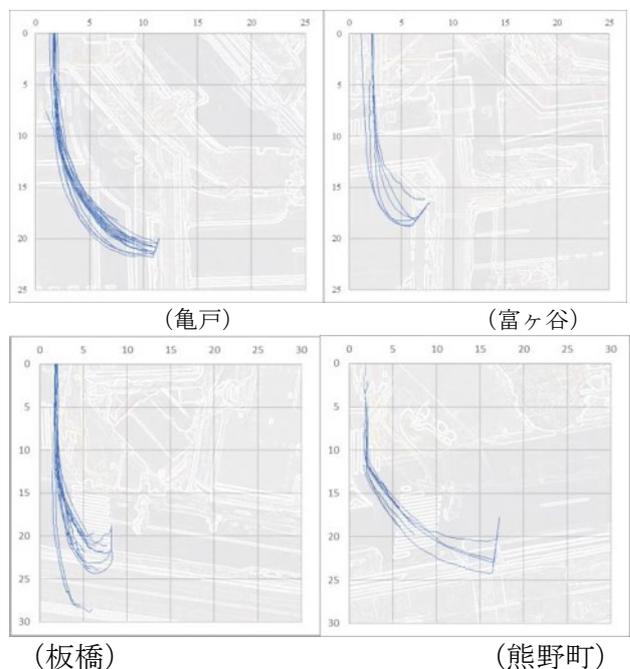


図-2.21 左折車の走行軌跡

角度のまま交差点に進入することになる。これにより、左折車が十分に速度を落とせないまま横断帯や横断歩道で自転車と錯綜する可能性が高くなり、危

険な錯綜につながることを予想される。板橋交差点の走行軌跡では、大回りしている左折車を確認できるが、これは速度を落とさず交差点に進入したことが原因であると考えられる。その他、整備形態や隅切半径、停止線セットバックなど交差点条件の違いが、左折車走行挙動に関係していると考えられる。

(4) 錯綜危険度の分析結果

a) 交差点別 TTC の算出結果

最小となった TTC の平均値を交差点別に比較すると(表-2.5), 熊野町交差点が最も小さく、次いで富ヶ谷, 板橋交差点が小さくなった。また, TTC の発生割合を交差点別に比較すると(図-2.22), 熊野町, 板橋交差点の順に 1.0s 未満の発生割合が高くなった。ここで, 母集団が異なると仮定し U 検定を行った結果, 亀戸と熊野町に有意差($p < 0.01$)があった。

b) 自転車通行位置別 TTC の算出結果

最小となった TTC の平均値を自転車通行位置別に比較すると(表-2.6), 車道通行 1 台のパターンが最も小さくなった。車道通行とは, 左折車と直進自転車が並列に走行するパターンを指す。

また, TTC の発生割合を自転車通行位置別に比較すると(図-2.23), 車道通行 1 台, 歩道通行複数台の順に 1.0s 未満の発生割合が高くなった。母集団が異なると仮定し U 検定を行った結果, 歩道通行 1 台と歩道通行複数台に有意差($p < 0.05$)があった。このことから, 歩道通行の場合, 複数台との錯綜が危険になりやすいといえる。

c) 複数台錯綜パターン

選択的錯綜の自転車走行の組み合わせでは(表-2.7), A-A が最も多いパターンとなった。次いで, A-D, A-B のパターンが多くなっており, TTC が最小となる自転車は, A (順走) がほとんどを占めている。また, C (対面) の自転車に関わる錯綜が少ないことも分かる。

TTC の分布状況からは(表-2.8), 2 台目の自転車の TTC が 1 台目の自転車の TTC よりわずかに大きいことが分かった。このことから, どちらか 1 台の自転車を選択する判断のなかで結果的に危険になってしまうケースがあることが分かる。ここで, 1 台目と 2 台目の TTC の平均値には, 統計的有意差($p < 0.01$)があった。

d) 通行パターン別 TTC の算出結果

1 台目の自転車の平均 TTC を通行パターン別に比較すると(表-2.9), A, B の TTC は C の TTC より小さく, その差は統計的に有意であった($p < 0.01$)。

2 台目の自転車の平均 TTC を通行パターン別に比較すると(表-2.10), 1 台目と同様に, A, B の TTC は C より小さく, その差は統計的に有意であった($p < 0.01$)。

これまでの基礎分析の結果, 交差点構造や自転車

表-2.5 交差点別の平均 TTC

	件数	平均(s)	標準偏差
亀戸	32	1.98	0.619
富ヶ谷	12	1.71	0.983
板橋	22	1.75	0.953
熊野町	17	1.43	1.022

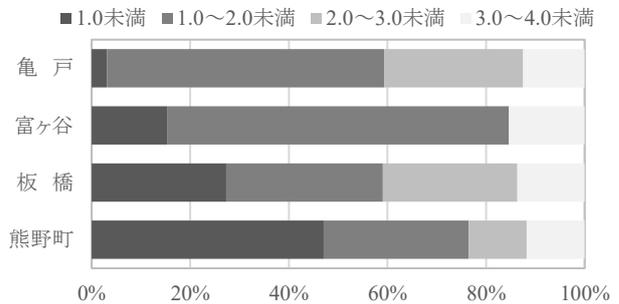


図-2.22 交差点別の TTC 発生状況

表-2.6 自転車通行位置別の平均 TTC

	件数	平均(s)	標準偏差
1-車道	3	1.05	0.152
1-歩道	44	2.06	0.994
多-歩道	30	1.50	0.652
多-混在	6	1.35	0.429

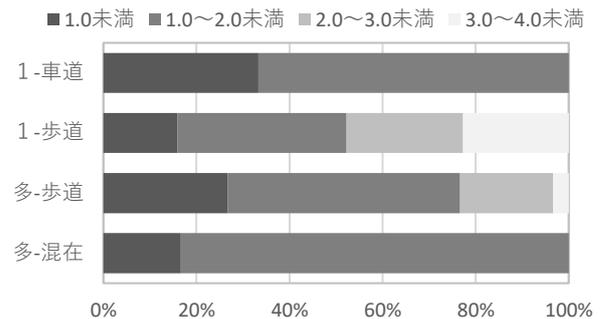


図-2.23 通行位置別の TTC 発生状況

表-2.7 通行パターンの組み合わせ

	2 台目				計	
	A:順走	B:横断	C:対面	D:停止		
1 台目	A:順走	22	4	3	6	35
	B:横断	2	1	-	2	5
	C:対面	2	-	1	1	4
	D:停止	-	-	-	-	0
計	26	5	4	9	44	

表-2.8 最小 TTC の組み合わせ

	2 台目				計	
	<0.5	<1.0	<2.0	>2.0		
1 台目	<0.5	-	1	-	-	1
	<1.0	-	-	2	5	7
	<2.0	-	-	6	18	24
	>2.0	-	-	-	12	12
計	0	1	8	35	44	

表-2.9 通行パターン別平均最小 TTC (1 台目)

	A:順走	B:横断	C:対面
件数	35	5	4
平均(s)	1.6	1.5	2.6
標準偏差	0.77	0.27	0.82

通行位置の違いが、錯綜危険度に与える影響が大きいことが明らかになった。特に歩道通行の場合は、複数台の自転車が錯綜すると危険になりやすく、複数台の自転車通行パターンとしては順走と順走の組み合わせが半数を占めていた。これらから、車両の速度が出やすい交差点や見落としが発生しやすい交差点では、複数の順走自転車が同時に交差点に進入することが危険な状況を引き起こす可能性があることが示唆された。

(6) まとめ

得られた結果とそれに基づく示唆を以下に示す。

- 交差点に進入する左折車、自転車の走行軌跡は整備形態によって違いが見られ、その違いが錯綜の危険度と大きく関係している可能性が示された。
- 整備形態の異なる交差点では、最小となる TTC の平均値に有意差が見られ、その原因として、左折車の挙動や交差点条件が関わっている可能性が示された。
- 交差点を進入する自転車の安全性では、最小となる TTC 値は、歩道通行 1 台よりも歩道通行複数台の方が有意に低く、選択的な錯綜により危険な状況にある可能性が示された。
- 安全性を高めるためには、左折車から歩道通行の自転車を認識できるよう工夫する必要がある。左折車の流入速度・左折位置を制限して自転車との錯綜場所を明確にする、左折車と横断帯(歩道)を正対させる、などの改善案が考えられる。
- プロテクテッド型交差点と比較した日本の信号交差点の特徴として、自転車の交差点流入位置がわかりづらく、左折車ドライバと自転車の通行の優先についてもわかりづらい状況にある。左折車の進入速度を抑制することに加え、自転車の流入路を明示し、その幅員を狭めることでショートカット挙動を制限する、自転車を複数同時に交差点に進入させない、流出口で自転車の順序を入れ替えさせないなどの対策が考えられる。また、こういった物理的な対策が困難な場合には、自転車専用信号の導入も検討すべきである。

表-2.10 通行パターン別平均最小 TTC (2 台目)

	A:順走	B:横断	C:対面	D:停止
件数	26	5	4	9
平均(s)	2.3	2.2	3.5	-
標準偏差	0.74	0.20	0.29	-

参考文献

- 1) Jennifer Warnera, David S. Hurwitza, Christopher M. Monsereb, Kayla Fleskesa, “A simulator-based analysis of engineering treatments for right-hook bicycle crashes at signalized intersections”, *Accident Analysis & Prevention* (2017), Vol. 104, pp. 46-57.
- 2) Katerina Deliali, Eleni Christofa, Michael Knodler Jr, “The role of protected intersections in improving bicycle safety and driver right-turning behavior”, *Accident Analysis & Prevention* (2021), Vol. 159, 106295.
- 3) Hanne Beate Sundfør, Fridulv Sagberg, Alena Høye, “Inattention and distraction in fatal road crashes - Results from in-depth crash investigations in Norway”, *Accident Analysis & Prevention* (2019), Vol. 125, pp. 152-157.
- 4) Yingying Yan, Shiquan Zhong, Junfang Tian, Liang Song, “Driving distraction at night: The impact of cell phone use on driving behaviors among young drivers”, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* (2022), Vol. 91, pp. 401-413.
- 5) R. Miller and Qingfeng Huang, “An adaptive peer to peer collision warning system”, *IEEE 55th Vehicular Technology Conference* (2002), Vol. 1, pp. 317-321.
- 6) 国連欧州経済委員会：衝突被害軽減ブレーキに係る協定規則(第 131 号), 6.4.5 項, 2014.
- 7) Alexander Rasch, Gabriele Panero, Christian-Nils Boda, Marco Dozza, “How do drivers overtake pedestrians? Evidence from field test and naturalistic driving data”, *Accident Analysis & Prevention* (2020), Vol. 139, 105494.
- 8) Ali Mohammadi, Giulio Bianchi Piccinini, Marco Dozza, “How do cyclists interact with motorized vehicles at unsignalized intersections? Modeling cyclists’ yielding behavior using naturalistic data”, *Accident Analysis & Prevention* (2023), Vol. 190, 107156.
- 9) Jessica S. Jermakian, Shan Bao, Mary Lynn Buonarosa, James R. Sayer, Charles M. Farmer, “Effects of an integrated collision warning system on teenage driver behavior”, *Journal of Safety Research* (2017), Vol. 61, pp. 65-75.
- 10) Louise Kerruish, Andy S.K. Cheng, Kin-Hung Ting, Karen P.Y. Liu, “Exploring the sustained and divided attention of novice versus experienced drivers”, *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives* (2022), Vol. 16, 100702.
- 11) 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, Issue 2, pp. A_273-A_280, 2022 年 2 月.

第3章 モバイルプローブ自転車を用いた自転車走行環境と利用者挙動との関連分析

3.1 モバイルプローブ自転車の動作検証

(1) 概要

モバイルプローブ自転車(以下「プローブ自転車」)の改良後の概要とその動作検証の結果を記載する。1台目は安価版(図-3.1)で自転車速度、離隔距離、自動車の追越し速度等を簡易的に計測することが可能である。2台目は、本委託においてLidarセンサ、GNSSを付加し、自動車の相対速度、離隔距離等を自動で収集することが可能な高価版プローブ自転車(図-3.2)へと改良を行った。

高価版プローブ自転車は、主に、自転車用のログ記録ソフトVelodyne Lidar社製のVLP-16(全方位レーザーLidarイメージユニット)から構成される。ログ記録ソフトからは、自転車の速度および走行距離等が実験データとして出力される。Lidarからは、3次元の点群データが実験データとして出力され、自動車等の対象物の形状や相対的な位置関係を明らかにする



図-3.1 安価版プローブ自転車



図-3.2 高性能版プローブ自転車

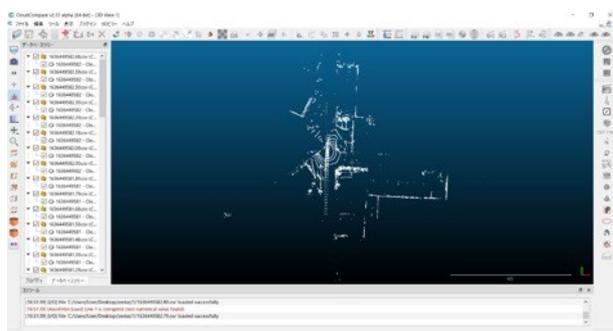


図-3.3 Lidarから出力された点群データ

ことが可能である。本研究では、点群データをもとに自動車との離隔距離および相対速度を算出することが可能である。

(2) Lidarデータの性能

動的なLidarセンサデータの精度がシミュレータ環境での再現性に大きく影響することから、データの精度を高めるための工夫の余地の検討と、自転車通行環境の詳細がどの程度判定できるかをデータ処理・解析過程において検証することとした。

a) 離隔距離と相対速度の出力

Lidarの性能検証に関しては、プローブ自転車にピソアート株式会社製のログ記録ソフト、Velodyne Lidar社製のVLP-16(全方位レーザーLidarイメージユニット)およびGOPRO、超音波センサを用いて、自転車を追越される際のデータを2種類収集した。この2種類のデータから自動車が自転車を追越す際(Passing Phase)の離隔距離および自動車と自転車の相対速度を比較することとした。

Lidarからは3次元の点群データがデータとして出力され、自動車等の対象物の形状や相対的な位置関係を明らかにすることが可能であり、自転車周辺を通行する自動車、歩行者等の挙動データに加工し、自転車周辺の安全性評価等に活用が可能である。Lidarから出力されるデータは10HzでCSVデータが出力され、図-3.3のようにビューアを用いて描画さ

れる。このCSVデータは図-3.4のようになっている。このデータから自動車のみを抽出すると図-3.5のようになり、このデータから自動車のX, Y座標で相対位置およびGPSデータより計測時の時刻を算出し、ビソアート株式会社製のログ記録ソフトを改良したソフトウェアで相対距離および相対速度を出力させることとした。

b) 自転車周辺環境の取得

Lidarデータ（センサは自転車右後方に設置）による自転車周辺環境の取得状況に関しては、設置方向側の周辺の樹木（高木、低木）、縁石（高さ20cm程度）なども検出できていることがわかる（図-3.6, 図-3.7）。なお、自転車が静止状態では周辺状況の施設等を検出できるものの、走行状態の場合には、センサ自体が自転車とともに傾くことにより精度が低下することや、長い時間を調査する場合には別途安定した電源確保が必要であるなどの対応が必要になることがわかった。

c) プローブ自転車の性能検証の方法

プローブ自転車の性能検証として、自転車を追い越す際の自動車の速度および離隔距離を計測し、同じタイミングで実測した値と比較を行った。離隔距離の計測に関しては、自転車の右側に装着している超音波センサを用いて行い、そのデータを記録するデータロガー用のタブレットPCに接続した。離隔距離に関しては、前後のカメラの映像内に前後方向へ3mの距離の位置に線を挿入し、カメラ間距離と合計した6.91mの区間（図-3.8）を走行する時間から自転車と自動車の相対速度が計測できることが水尻らの研究等から知られており、式-3.1より算出した。

$$V_{car} = \frac{6.91}{t_{front} - t_{rear}} \times 3.6 + V_{bike} \quad \text{式-3.1}$$

V_{car} :自動車速度(km/h), V_{bike} :自転車速度(km/h), t_{front} :前カメラ計測時間, t_{rear} :後カメラ計測時間

d) 精度検証の結果

性能検証は、まず自転車を停止した状態で、道路の路肩において計測する方法と自動車のクルーズコントロール機能を用い、自転車ドライバーに等速で運転した際のデータを計測する2種類を実施した。停止中のプローブ自転車を一般自動車が進む際の速度・離隔距離に関して、精度検証を行った。具体的には、下記図にあるように路側に2つのカラーコーンを自転車の前後3mに配置し、それと垂直の位置にビデオカメラを配し、その2つのカメラのカラーコーンを通過する自動車の時間差分を用いて、速度を計測した（図-3.9）。

Choose an attribute for each column					
8	9	10	11	12	13
Ignore	coord.X	coord.Y	coord.Z	Ignore	Ignore
vtkOriginalPointIds	Points0	Points1	Points2	_vtkSelected_	vtkCompositeIndex
7681	3.62625	-14.501	-0.783365	0	1
7688	3.17692	-14.4015	-0.772897	0	1
7689	3.17663	-14.4125	-0.772897	0	1
7693	3.02797	-14.1968	-0.760735	0	1

図-3.4 Lidarからの出力データのサンプル

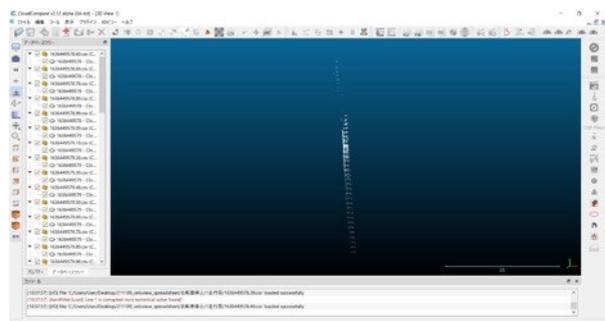


図-3.5 自動車の軌跡を抽出した結果



図-3.6 通行環境の識別状況1

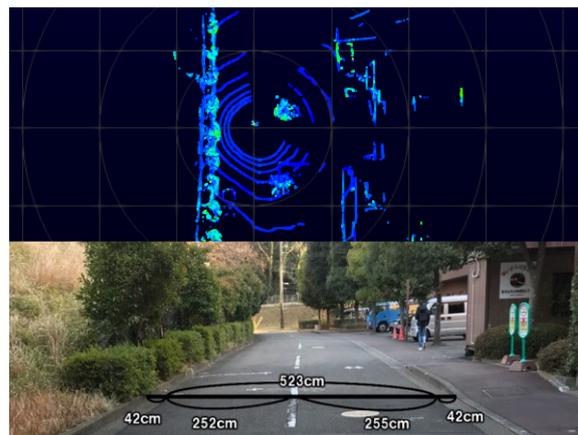


図-3.7 通行環境の識別状況2（画像のみ左右反転）



図-3.8 追越しに関わる各区間の設定

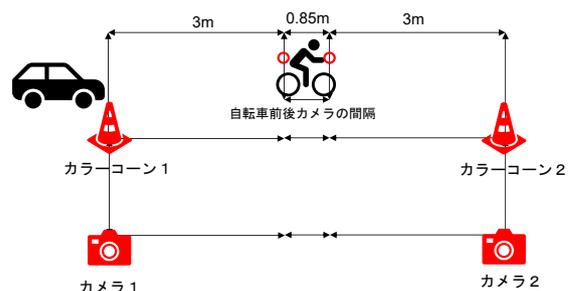


図-3.9 速度計測の概要

e) 自転車停止時の検証結果

離隔距離に関しては、プローブ自転車の前方に後方にGOPROを装着した自転車を置き、その画像から計測した。この検証での離隔距離の精度の結果を図-3.10に示す。また、速度の精度の結果を図-3.11に示す。離隔距離に関しては誤差率5.11%であり、追越し速度に関しては誤差率1.65%であった。

f) 自転車追い越し時の検証結果

自動車はクルーズコントロールを使用し、時速30kmで自転車を追い越す自動車に対して精度検証を行った。離隔距離に関する精度の結果を図-3.12に、速度に関する精度の結果を図-3.13に示す。離隔距離に関しては誤差率8.29%であり、追い越し速度に関しては誤差率2.62%であった。

(3) 精度検証の応用実験

a) 概要

前項の結果を通じ、プローブ自転車の離隔距離および自動車の追越し速度のデータ精度が充分であると判断したので、次年度以降の実運用に向け、実道における追越し実験でのデータ収集を試行した。具体的には、学生と高齢者が運転する自転車に対する自動車の追越し挙動の把握と自転車運転者の危険感の計測を行った。実験を行った場所を図-3.14に示す。県道47号線(越の山入口バス停留所前～寒川東中学校入口)を用いた。片側1車線、規制速度40km/h、長さ600mの道路であり、交通量は実験実施中の平均で243台/時間である。

b) 実験方法

実道路で実験参加者が車道走行し、一般車が追越しを行う自転車が車道を直進し、自動車が自転車を追い越す。自動車は一般車両を用い、自転車は実験参加者が走行する。また、4段階(0:安全・・3:非常に危険)で危険感を記録した。実験開始前のインフォームドコンセントにおいて、全実験参加者に対し、1)実験により生じる実験参加者への不利益、2)プライバシーへの配慮、3)実験に参加しない自由の確保、に関して十分な説明を行い、実験に参加することの同意を得た。実験の所要時間は、一人当たり実走実験で約30分程度であった。表-3.1に示すように、本実験の学生の参加者は、20代前半の10名であり、高齢者は70～83歳の10名であった。追越しのサンプル数は合計400追越し(学生:200, 高齢者:200)であった。

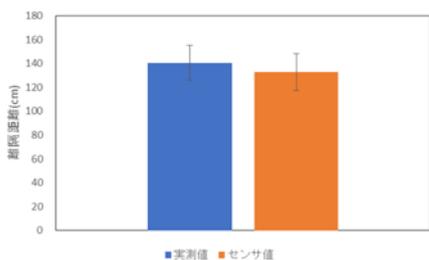


図-3.10 停止中の精度検証(離隔距離)

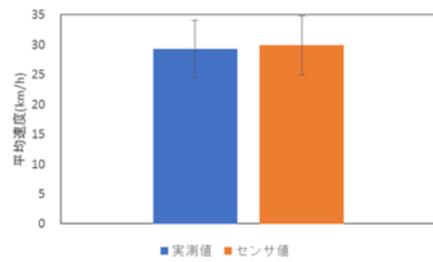


図-3.11 停止中の精度検証(速度)

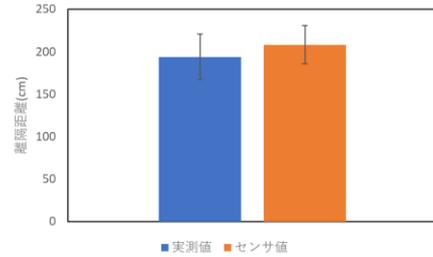


図-3.12 走行中の精度検証(速度)

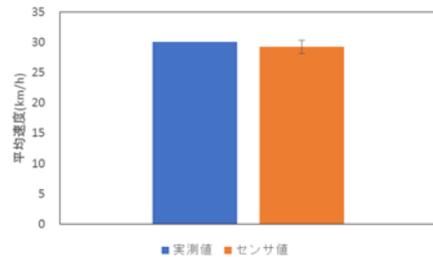


図-3.13 走行中の精度検証(離隔距離)



図-3.14 実験場所

表-3.1 被験者の属性

被験者	年齢	性別	視力			自転車運転頻度
			運転時	右	左	
A	22	男	裸眼	0.9	0.7	月に1回程度乗車
B	22	男	裸眼	1.0	1.0	ほぼ毎日乗車
C	22	女	眼鏡・コンタクト	1.0	1.0	月に1回程度乗車
D	21	女	眼鏡・コンタクト	1.0	1.0	めったに利用しない
E	22	男	裸眼	1.5	1.5	週に1~2回程度
F	21	男	眼鏡・コンタクト	1.0	1.0	週に1~2回程度
G	21	男	裸眼	1.5	1.5	週に1~2回程度
H	22	男	裸眼	1.0	1.0	めったに利用しない
I	22	男	裸眼	1.2	1.0	月に1回程度乗車
J	22	男	眼鏡・コンタクト	1.0	1.0	月に1回程度乗車
A	77	女	裸眼	0.8	0.7	ほぼ毎日乗車
B	78	女	裸眼	0.8	0.7	ほぼ毎日乗車
C	74	女	眼鏡・コンタクト	0.7	0.7	めったに利用しない
D	83	男	裸眼	0.7	0.7	週に3~4回程度
E	71	男	眼鏡・コンタクト	1.2	1.2	ほぼ毎日乗車
F	81	男	眼鏡・コンタクト	0.6	0.6	週に1~2回程度
G	72	男	裸眼	0.3	0.2	週に1~2回程度
H	78	男	裸眼	1.0	1.0	ほぼ毎日乗車
I	70	男	眼鏡・コンタクト	0.5	0.5	週に3~4回程度
J	80	男	裸眼	1.0	1.0	月に1回程度

c) 実験結果（離隔距離と速度の関係）

車種別の追越し速度に関して、学生・高齢者の結果を図-3.15に示す。一般車の追越し速度に関して、t検定を行った結果、学生・高齢者の間に有意傾向になることが分かった($t(319) = -1.85, p < 0.10$)。このことから、高齢者に対する一般車による追越し速度は、学生に対する一般車の追越し速度と比較して、小さくなる傾向があることがわかった。また、大型車の追越し速度に関してt検定を行った結果、学生・高齢者の間に有意な差がみられなかった。しかし、高齢者に対する一般車による追越し速度は、学生に対する一般車の追越し速度と比較して、ばらつきが大きくなることがわかった。[

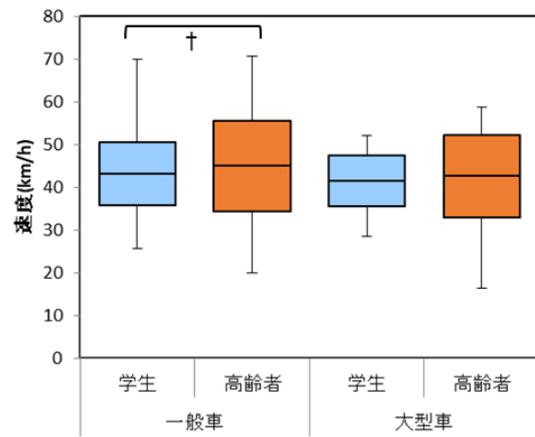


図-3.15 車種別の速度の学生・高齢者間での比較

d) 車種及び属性の離隔距離比較

次に、車種別の離隔距離に関して図-3.16に示す。一般車の離隔距離に関してt検定を行った結果、学生・高齢者の間に有意な差がみられた($t(319) = 2.61, p < 0.01$)。この結果から、高齢者に対する一般車による離隔距離は、学生に対する一般車による離隔距離と比較して、小さいことが分かった。さらに、高齢者に対する一般車による離隔距離は、学生に対する一般車による離隔距離と比較して、ばらつきが大きいことが見て取れる。大型車の離隔距離に関してt検定を行った結果、学生・高齢者の間に有意な差がみられなかった。しかし、高齢者に対する大型車による離隔距離は、学生に対する大型車による離隔距離と比較してばらつきが大きいことが見て取れる。

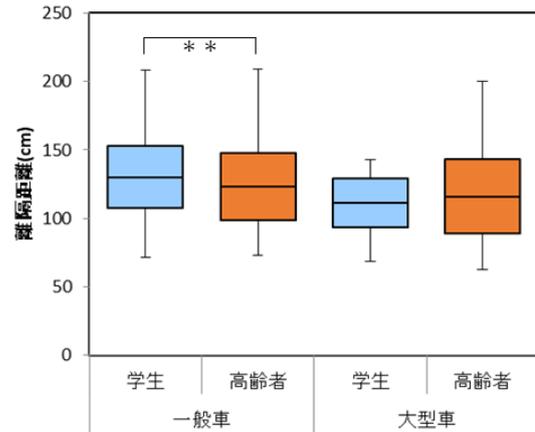


図-3.16 車種別の速度の学生・高齢者間での比較

e) 対向車との位置関係別の速度比較

対向車との位置関係別の追越し速度に関して、学生・高齢者の結果を図-3.17に示す。対向車までの位置関係が2秒以下の追越し速度に関してt検定を行った結果、学生・高齢者の間に、有意な傾向がみられた($t(142) = 1.90, p < 0.10$)。この結果から、高齢者に対する対向車までの位置関係が2秒以下の追越し速度は、学生に対する対向車までの位置関係が2秒以下の追越し速度と比較して、大きいことが分かった。対向車までの位置関係が2秒から5秒の追越し速度に関してt検定を行った結果、学生・高齢者の間に有意な差がみられた($t(83) = -3.12, p < 0.01$)。この結果から、高齢者に対する対向車までの位置関係が2秒から5秒の追越し速度は、生に対する対向車までの位置関係が2秒から5秒の追越し速度と比較して、小さいことが分かった。対向車までの位置関係が5秒以上の追越し速度に関してt検定を行った結果、学生・高齢者の間に有意な差がみられた($t(169) = -3.90, p < 0.01$)。この結果から、高齢者に対する対向車までの位置関係が5秒以上の追越し速度は、学生に対する対向車までの位置関係が5秒以上の追越し速度と比較して、小さいことが分かった。

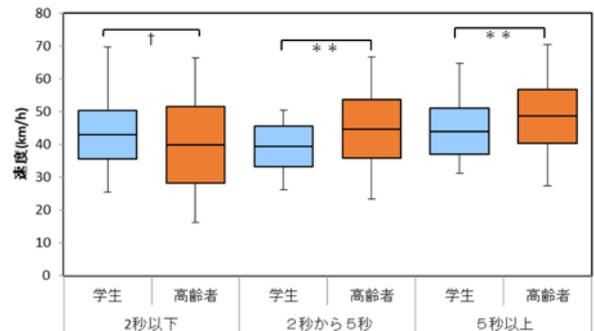


図-3.17 対向車との位置関係別の速度の学生・高齢者間での比較

f) 対向車との位置関係別の離隔距離比較

対向車との位置関係別の離隔距離に関して、学生・高齢者の結果を図-3.18に示す。対向車までの位置

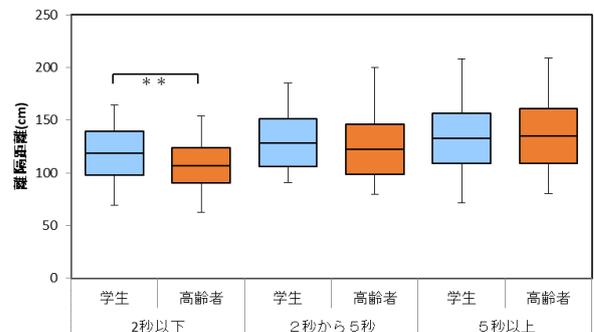


図-3.18 対向車との位置関係別の離隔距離の学生・高齢者間での比較

関係が2秒以下の離隔距離に関してt検定を行った結果、学生・高齢者の間に有意な差がみられた($t(142) = 3.50, p < 0.01$)。この結果から、高齢者に対する対向車までの位置関係が2秒以下の離隔距離は、学生に対する対向車までの位置関係が2秒以下の離隔距離と比較して、小さいことが分かった。

また、対向車までの位置関係が2秒から5秒の離隔距離に関してt検定を行った結果、学生・高齢者の間に有意な差はみられなかった。また、対向車までの位置関係が5秒以上の離隔距離に関してt検定を行った結果、学生・高齢者の間に有意な差がみられなかった。

(4) 危険感に関する分析

a) 車種別属性別の危険感の感じ方の比較

自動車が進み越す際の、自転車に乗る学生及び高齢者が感じた危険感のデータに関する分析を行った。危険感には4段階(0:安全, 1:少し危険, 2:危険, 3:非常に危険)で記録し、「0:安全」を「危険感無し」とし、それ以外を「危険感有り」として集計した。

一般車と大型車の自転車追越しに対する危険感の割合の結果を図-3.19に示す。学生について、車種によって、危険感の感じ方に違いがあるかどうかについて関連性を見るために χ^2 検定を行った結果、 $p < 0.01$ で有意な差がみられた。この結果より、大型車による追越し挙動に対する危険感には、一般車による追越し挙動に対する危険感と比較して、有意に大きいことが分かった。

次に、高齢者についても、車種によって、危険感の感じ方に違いがあるかどうかについて関連性を見るために χ^2 検定を行った結果、 $p < 0.01$ で有意な差が得られた。この結果より、大型車による追越し挙動に対する危険感には、一般車による追越し挙動に対する危険感と比較して、有意に大きいことが分かった。また、高齢者は、学生と比較して、危険感を感じやすいことが見て取れる。特に、大型車に対する危険感に関しては、学生と比較して、高齢者のほうが危険感を感じる割合が大きいことが見て取れる。

b) 危険感と離隔距離・追越し速度の関係(学生)

学生の危険感と離隔距離に関して、図-3.20に示す。また、学生の危険感と追越し速度に関して、図-3.21に示す。図-3.20より、学生に関しては、離隔距離が小さいほど危険感を感じやすいことが見て取れる。

学生の離隔距離・速度と危険感の関係を散布図として図-3.22に示す。この結果から、学生に関しては、離隔距離が小さいほど危険感を感じやすいことが見て取れる。しかし、離隔距離が十分に確保されていても、速度が著しく大きい場合、危険感を感じることも見て取れる。

c) 危険感と離隔距離・追越し速度の関係(高齢者)

高齢者の危険感と離隔距離に関して、図-3.223に示す。また、高齢者の危険感と追越し速度に関して、

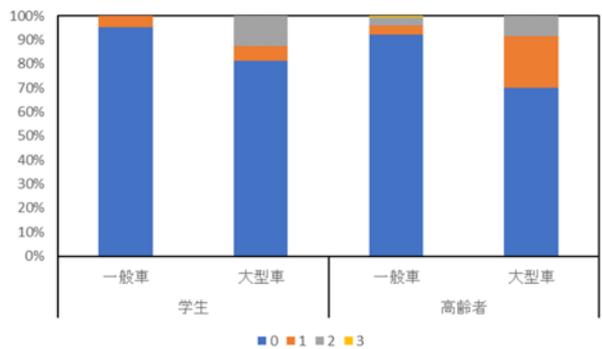


図-3.19 車種別の危険感の感じ方の学生・高齢者間での比較

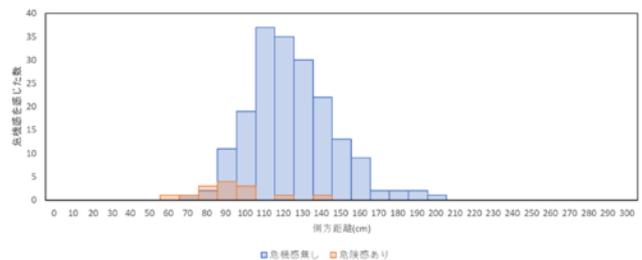


図-3.20 危険感と離隔距離(学生)

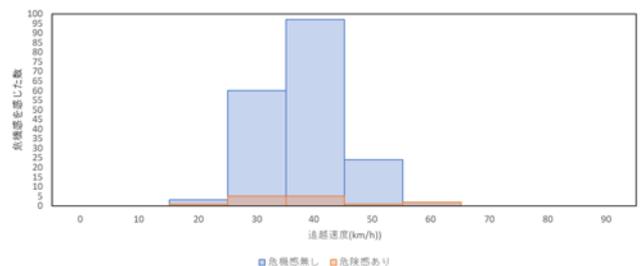


図-3.21 追越し速度と危険感(学生)

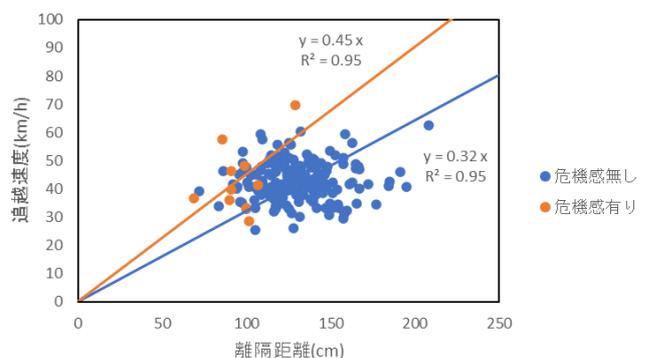


図-3.22 追越し速度・離隔距離と危険感の関係(学生)

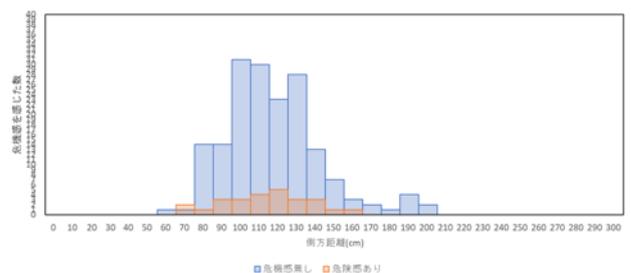


図-3.23 離隔距離と危険感(高齢者)

図-3.24に示す。図-3.23より、高齢者に関しては、離隔距離に比較的余裕がある場合でも危険感を感じやすいことが見て取れる。高齢者の離隔距離・速度と危険感の関係を示す散布図を図-3.25に示す。この結果から、高齢者に関しては、離隔距離、速度と危険感の関係性が小さいことが見て取れる。一方、学生に関しては、離隔距離が小さいほど危険感を感じやすい。また、離隔距離がある程度余裕のある幅を保っていても、追越し速度が著しく高い場合、危険感を感じる事が分かった。それに対して高齢者は、離隔距離・速度と危険感との関連が小さいことも見て取れる。

d) 危険感に関するモデル化

危険感と離隔距離を4段階(0:安全, 1:少し危険, 2:危険, 3:非常に危険)で記録したものを、「0:安全」を安全、それ以外を危険と分類した。さらに、危険感と速度、離隔距離、高齢者ダミー、大型車ダミーの関係を二項ロジスティック回帰分析にて、モデル化を行った結果を表-3.2に示す。また、モデル式を式-3.2に示す。

$$Z = \frac{1}{1 + \exp[-(0.032x - 0.025y + 0.449z + 1.443w - 1.408)]} \quad \text{式-3.2}$$

その結果、車種・属性(高齢者・学生)の順に危険感への影響が大きいことが分かった。そのことから、大型車は一般車と比較して危険感を感じやすいこと、また、高齢者は学生と比較して、危険感を感じやすいことが分かった。

その他の係数に関しては、速度の係数は正であり、追越し速度が大きくなるほど危険感が大きくなる事が分かる。また、離隔距離の係数は負であり、離隔距離が大きくなるほど危険感を感じにくいことが分かる。

(5) モバイルプローブ自転車の動作検証のまとめ

本節では、保有するモバイルプローブ自転車に、LidarセンサやGNSSを付加するシステム改良を行ったプローブ自転車のシステム概要を取りまとめた。また、このシステムを用いた性能検証を行い、自動車の追越し時の速度、離隔距離で非常に精度の良い結果を得ることが出来た。更に、高齢者と学生による比較実験を通して、自動車追越し時の自転車利用者に対する自動車の追越し挙動の解析および自転車利用者の危険感特性を抽出した。これらの実験から、今後は、自動車・自転車間の錯綜時や追越し時の挙動分析、心理的負担の計測を行うことで、CCS等にフィードバックする予定である。更には、道路行政への活用としては、自転車道整備の効果・評価への活用やトンネル部などの自転車走行空間の安全性評価等への活用が期待される。

参考文献

1) 水尻翼,辰巳浩,吉城秀治,堤香代子,向井康裕:車道

- 走行する自転車が自動車の走行挙動に及ぼす影響に関する研究,交通工学論文集,Vol.5,pp.A_64-A_72,2019. https://doi.org/10.14954/jste.5.2_A_64
- Walker, I. “Drivers overtaking bicyclists: Objective data on the effects of riding position, helmet use, vehicle type and apparent gender”. Accident Analysis and Prevention, Vol.39, No.2, pp.417-786, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2006.08.010>
 - Jordanka Kovaceva, Gustav Nero, Jonas Bärghman, Marco Dozza, “Drivers overtaking cyclists in the real-world: Evidence from a naturalistic driving study”, Safety Science, Vol.119, pp.199-206, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.08.022>
 - Ben Beck, Monica Perkins, Jake Olivier, Derek Chong, Marilyn Johnson: “Subjective experiences of bicyclists being passed by motor vehicles:The relationship to motor vehicle passing distance”, Accident Analysis & Prevention, Vol.155,2021. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106102>

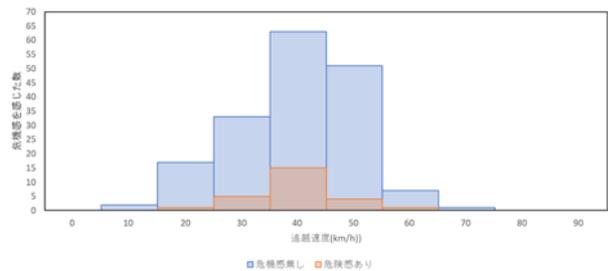


図-3.24 追越し速度と危険感(高齢者)

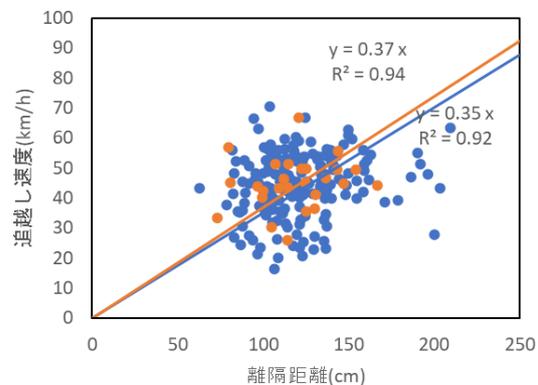


図-3.25 追越し速度・離隔距離と危険感の関係(高齢者)

表-3.2 危険感の二項ロジスティック回帰分析結果

	偏回帰係数	オッズ比	P 値	判定	
説明変数	速度	0.032	1.033	0.112	
	離隔距離	-0.025	0.976	0.004	**
	高齢者ダミー	0.449	1.567	0.222	
	大型車ダミー	1.443	4.234	0.000	**
定数項	-1.408	0.245	0.274		
決定係数	Cox-Snell R2乗		Nagelkerke R2乗		
	0.082		0.172		
回帰式の有意性	P<0.001				
判別的中率	89.800%				

(※括弧内t値)

3.2 モバイルプローブ自転車を使った交差点調査

(1) はじめに

本節では、東京都内・神奈川県内の異なる信号交差点において、自転車視点からの危険対象物体をリアルタイムに直接観測できるLidarセンサを搭載した自転車(Lidarプローブ自転車)を用い(図-3.26)、観測データの特徴を把握した上で、観測データの錯綜危険度評価における有用性を錯綜危険度指標である、TTC(Time to Collision)指標を算出できるかという観点から有用性を明らかにすることと、そのデータから交差点交差角の違いがTTCに与える影響について評価することを目的とする。



図-3.26 改良したプローブ自転車の概観

(2) 方法

a) 調査方法

LiDARセンサによる左折車の観測が行えるかを分析するため、交差角の違い等、構造的に違いのある信号交差点を対象として選定した。遠藤東交差点はRTK-GNSSによる測定に影響を及ぼす要因の少ない交差点として選定した。対象交差点とその所在地、観測日時、観測地点数、交差角、LiDARプローブ自転車による走行観測の有無を表-3.3に示す。

本研究では、対象交差点にてLiDARプローブ自転車を特定の地点に静止して観測する固定パターンと移動しながら観測する走行パターンで左折車の挙動を観測した。固定パターンでは、既往研究において危険な錯綜が多いとされている、自転車の歩道通行パターンで交差点に進入し、時速20km/hで走行する自転車が交差点侵入前の約3.0秒、1.5秒となる①～④の地点としている(図-3.27)。各固定地点において、左折車を5台程度ずつ観測した。また、走行しながらの観測については、図-3.28に示す2パターンの軌道を走行した。

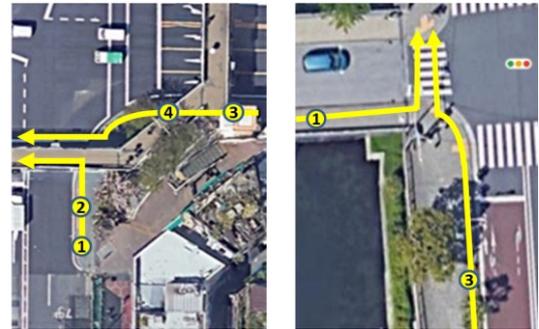


図-3.27 各交差点の固定観測点

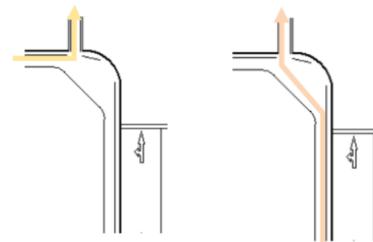


図-3.28 走行パターン

表-3.3 対象交差点

交差点名	亀戸駅前	錦糸橋前	板橋中央陸橋	志村3丁目(鋭角部分)	志村3丁目(鈍角部分)	遠藤東
所在地	東京都江東区 亀戸6丁目	東京都江東区 亀戸2丁目	東京都板橋区 東山町	東京都板橋区 志村3丁目	東京都板橋区 志村3丁目	神奈川県藤沢市 石川6丁目
観測日時	2022 11/22 14:00~15:30	2022 11/22 16:00~17:00	2023 1/12 9:50~11:30	2023 1/11 16:00~17:00	2023 1/11 17:00~18:00	2023 1/11 10:00~13:30
観測地点数	4地点	2地点	4地点	4地点	3地点	4地点
交差角	90°	90°	100°	70°	110°	90°
走行観測有無	無	無	有	有	有	有

b) 解析手法

LiDAR観測データから捉えた左折車の点群の座標を、図-3.29のように0.1秒毎にCSVファイルとして取り出し、その中から原点（LiDARセンサ）に最も近い点を抜き出し、その軌跡を左折車の軌跡とする。そのため、左折車がLiDARセンサに近づいてくる区間では、左折車の左前方部分によって描かれる軌跡、離れていく区間では左折車の左後方部分によって描かれる軌跡となっている。軌跡の始点は左折車の左前方部分が観測されたフレームの原点から最も近い点としている。

c) 用いる指標

左折車と自転車の衝突危険度を表す指標として、TTC (Time to Collision) 指標を用いる。TTCとは、速度と進行方向を維持すると仮定した場合の衝突までの時間(s)で定義される。

LiDARプローブ自転車を固定した状態で得られた観測データからTTCを求める手順として、LiDARプローブ自転車は実際には移動していないため、自転車側には速度と進行方向をベクトルとして与えた。左折車については、1フレーム間 (0.1秒) の左折車左前方部分座標の変化から左折車の速度ベクトルを算定した。左折車と自転車の速度ベクトルから交点を求め、交点に到達するまでの距離を左折車・自転車それぞれ求め、相対速度で除してTTCを求めた。なお、車体の全長を考慮しており、自転車の全長を2.0m、自動車の全長を5.0mとして計算している。

d) 分析項目

本研究ではLiDARセンサによる観測の基礎的な知見を得るためにLiDAR観測データの特徴分析を行う。

観測データから得られた左折車軌跡と同時に撮影したデータを比較することで交差点付近の工作物（柵や電柱等）や植栽等の影響について分析する。

簡易的な評価方法としては、時速20kmで自転車が走行しているときに左折車に対してTTCを求めることが可能かを評価する。

TTCが求めれば、錯綜対象の左折車を認識できるということであり、TTC値の大きさは左折車をどれだけ離れている地点から認識しているかを表す。TTC値が得られない場合は左折車を錯綜対象として認識できていないといえ、TTC値を求めるために必要な範囲の観測ができていないといえる。

自転車を固定したまま観測したデータから得られた左折車軌跡に時速20kmで交差点に進入する自転車の軌跡を与えTTCを算出し、交差点の形状（交差角）の違いがTTCに及ぼす影響について評価する。

自転車軌跡は左折車と順走方向で左折車がカーブを始める地点で進行方向を変えるよう設定し、交差点進入部は歩道と車道の境界で自転車が通行できる位置で自転車進行方向向かって最も右の地点とした。

e) LiDAR動的データを用いた左折車軌跡取得

LiDARプローブ自転車で走行しながら観測したデ

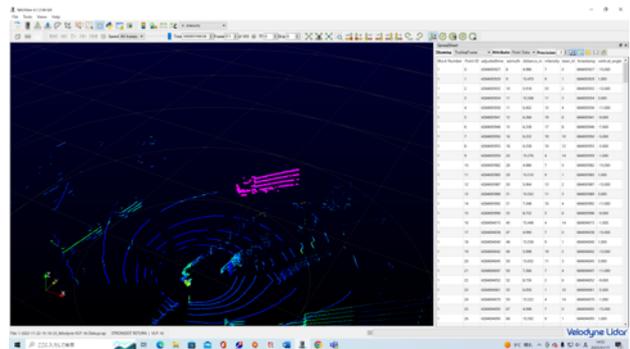


図-3.29 左折車を表す点群とその座標データ

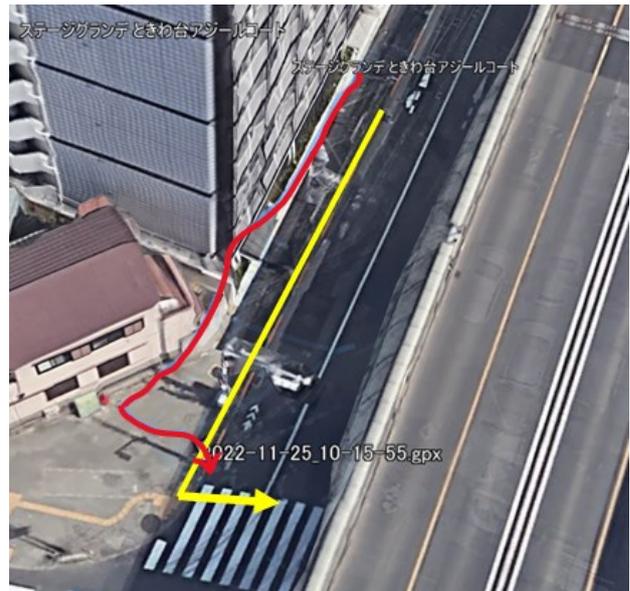


図-3.30 板橋交差点におけるRTK-GNSSの結果

ータを用いて左折車の軌跡を取得する。LiDARセンサで得られる点群は、LiDARセンサを原点とした三次元座標上に表されるので、走行時は原点が常に移動し補正をしなければ左折車軌跡を得られない。そこで本研究ではRTK-GNSSから得られた自転車の走行軌跡を用いて自転車の進行方向を求め、その方向をLiDARセンサのY軸正の方向として平面直角座標系9系のX軸方向に回転させることで補正し、左折車軌跡を算出した。

RTK-GNSSは建物密集地や高層ビル等、高い建物がある場合、図-3.29に示すようにデータの精度が低いので、そのような影響が小さいと考えられる遠藤東交差点で得たデータを用いた。

図-3.29の赤矢印は、板橋中央陸橋交差点においてRTK-GNSSを用いて測定した自転車軌跡を表しており、黄色矢印は実際に走行した軌跡を表している。実際には車道に沿って走行したものの、測定された走行軌跡は建物側を蛇行しながら走行しているようになっている。

(3) 軌跡の取得結果

主な交差点におけるLiDARプローブ自転車を用いて観測した左折車数の軌跡図を以下に示す。これは、左折車の軌跡を重ねあわせたもので、原点をLiDAR

プローブ自転車の位置とし、グラフ右上から左折車が流入し、グラフ左下へと流出する様子を示している。なお、グラフ軸の単位はmである。凡例の色は、青は普通車、オレンジはトラックである。軌跡の取得件数は表-3.4の通りである。

表-3.4 交差点 左折車観測台数

交差点	固定				移動	
	①	②	③	④	①	②
亀戸駅前	5	5	5	5	-	-
錦糸橋前	5		3		-	-
板橋中央陸橋	5	5	5	5	2	2
志村3丁目(鋭角)	5	5	5	5	2	2
志村3丁目(鈍角)	5	5	5	5	2	2
遠藤東	5	5	5	5	4	4

a) 亀戸駅前交差点②地点

亀戸駅前交差点②では(図-3.30)、柵等、工作物による左折車観測の妨げはないと思われる。一部途切れている部分については信号待ちをしている自転車によるものがあつた。左折車軌跡が途切れることなく得られた理由としては、観測地点が交差点に近づくときレーザ間の垂直方向の差が小さくなり左折車を捉えるレーザー光の数が増えたためと考えられる。

b) 錦糸橋前②地点

錦糸橋前交差点②では(図-3.30)、原点より後方15mほどの地点、原点より右前方の左折開始地点、原点より左前方の軌道が直線へと変化する地点で一度軌跡が途切れていることがわかる。これは、自転車の右後方に樹木があつたためである。また、原点より右前方の左折開始地点と原点より左前方の軌道が直線へと変化する地点についてはそれぞれ街灯柱と電柱が障害物となつていた。

c) 板橋中央陸橋交差点①地点

板橋中央陸橋交差点①では(図-3.31)、原点より右前方の地点と正面方向の地点、左前方の地点で軌跡が途切れていることがわかる。これは図-3.2.27に見える3本の柱(信号柱・街灯柱)がそれぞれ障害物となつたためである。

d) 志村3丁目交差点(鋭角部分)②地点

志村3丁目交差点(鋭角部分)②では(図-3.32)、原点より正面方向の地点、左前方の地点で軌跡が途切れていることがわかる。これはそれぞれ図-3.2.37に見える①地点においても障害となつた信号柱、街灯柱が障害物となつたためである。

e) 遠藤東交差点④地点

遠藤東交差点④では(図-3.34)、原点より正面方向において共通して軌跡が途切れている部分がある。これは、ポールが障害物となつたためである。ほかにもポールや信号柱等があるが、LiDARセンサの観測が10Hzで行われ、解析において左折車を表す点群のうち1点のみ抜き出しているため障害物と左折車との重なりが軌跡に表れていないと考えられる。

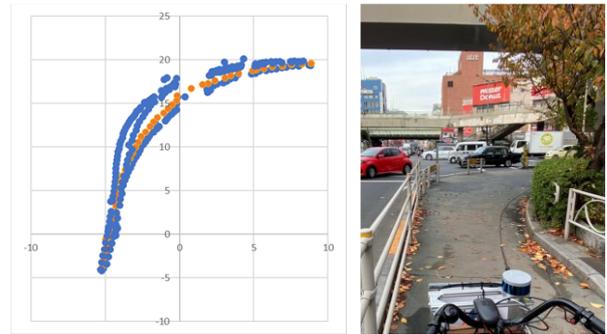


図-3.30 亀戸②地点の左折車の軌跡取得結果

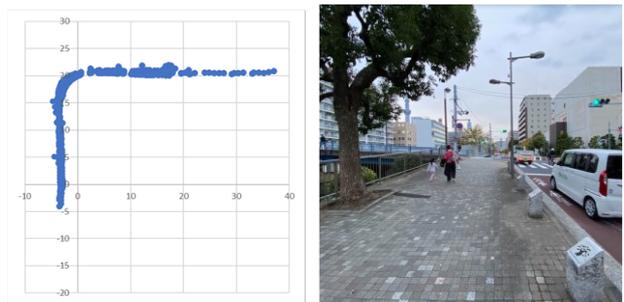


図-3.31 錦糸橋前②地点の左折車の軌跡取得結果

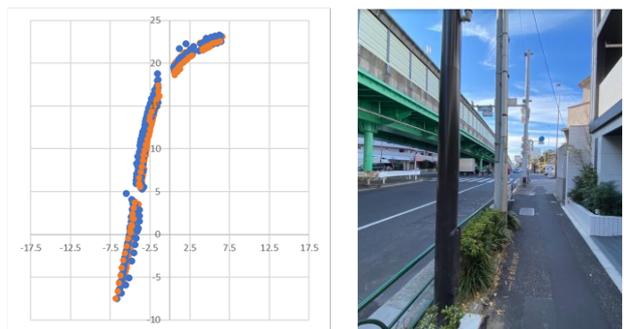


図-3.32 板橋中央陸橋①の左折車の軌跡取得結果



図-3.33 志村②地点の左折車の軌跡取得結果



図-3.34 遠藤④地点の左折車の軌跡取得結果

(4) TTC算出における観測範囲の評価

a) 亀戸駅前交差点

亀戸駅前交差点で観測した左折車軌跡から最初に得られるTTCを算出した結果を示す。地点①では、TTC値が3.0となる地点の左折車が観測されればよいが、平均して3.0を少し上回る値が出ているため、TTC値を算出するために十分な範囲の観測ができているといえる。③地点でも同様にTTC値が3.0となる地点の左折車が観測されればよく、観測した左折車5台のうち4台では平均してTTC値が3.0を上回る値が得られたが、残りの1台についてはTTCが得られなかったため、左折車の通行位置や速度によってはTTC値を算出するために十分な範囲の観測が行えない場合があるといえる。②、④地点についてもTTC値が1.5となる地点の左折車が観測されればよいが、平均して1.5を上回る値が出ているためTTC値を算出するために十分な範囲の観測ができているといえる。

b) 志村3丁目交差点（鋭角部分）

志村3丁目交差点（鋭角部分）で観測した左折車軌跡から最初に得られるTTCを算出した結果を図-3.35に示す。地点①、③では、TTC値が3.0となる地点

の左折車が観測されればよいが、①地点では5台観測したうち3台ではTTC値が得られなかったため十分な範囲の観測ができているといえない。③地点ではTTC値が3.0を大きく上回る値が得られているのでTTC値を算出するために十分な範囲の観測ができているといえる。地点②、④についても、TTC値が1.5となる地点の左折車が観測されればよいが、平均して1.5を上回る値が出ているためTTC値を算出するために十分な範囲の観測ができているといえる。

c) 志村3丁目交差点（鈍角部分）

志村3丁目交差点（鈍角部分）で観測した左折車軌跡から最初に得られるTTCを算出した結果を図-3.36に示す。地点①、③ではTTC値が3.0となる地点の左折車が観測されればよいが、①地点では5台観測したうち3台ではTTC値が得られなかったため十分な範囲の観測ができているといえない。③地点ではTTC値が3.0を大きく上回る値が得られているのでTTC値を算出するために十分な範囲の観測ができているといえる。④地点についてもTTC値が1.5となる地点の左折車が観測されればよいが平均して1.5を大きく上回る値が出ているためTTC値を算出するために十分な範囲の観測ができているといえる。

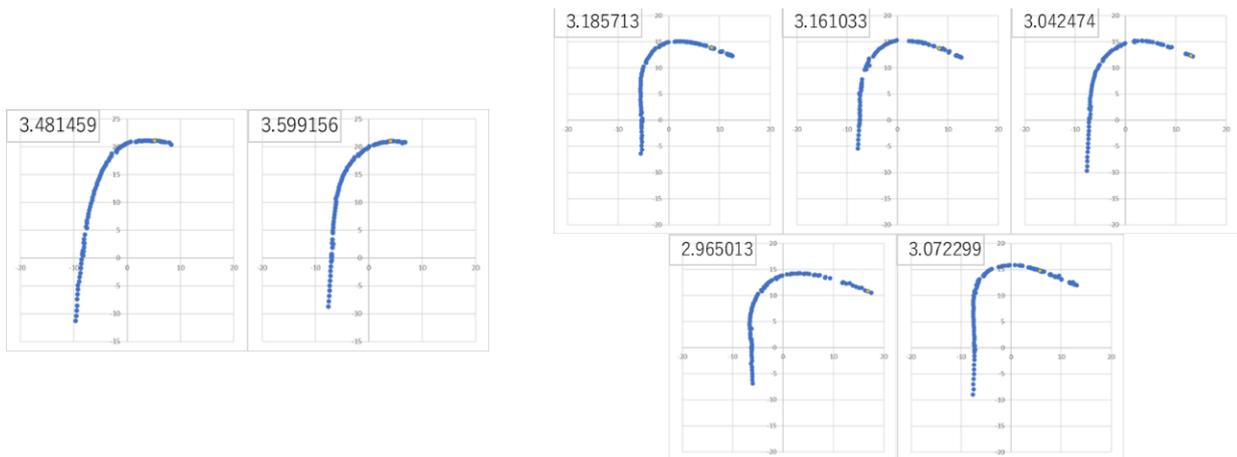


図-3.35 志村3丁目交差点（鋭角部分）①②のTTC算出結果

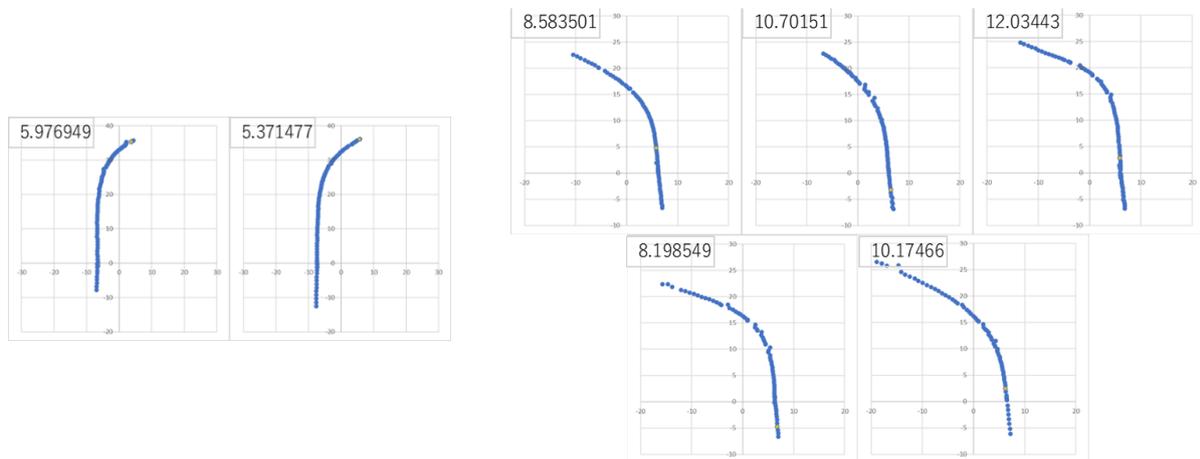


図-3.36 志村3丁目交差点（鈍角部分）①③のTTC算出結果

(5) 交差点交差角別のTTC算出結果

板橋中央陸橋交差点③地点で観測した左折車軌跡に自転車軌跡を与えTTCを算出した結果を図-3.37に示す。錯綜のタイミングとして、左折車先行と自

転車先行の2パターンに分けてTTCを求めている。青の点は自転車の交差点進入部までの距離をあわせて示している。交差点進入に近づくにつれて、TTCが小さくなる傾向を確認できるが、左折車の走行軌跡のバラツキにより、変動する様子も伺える。

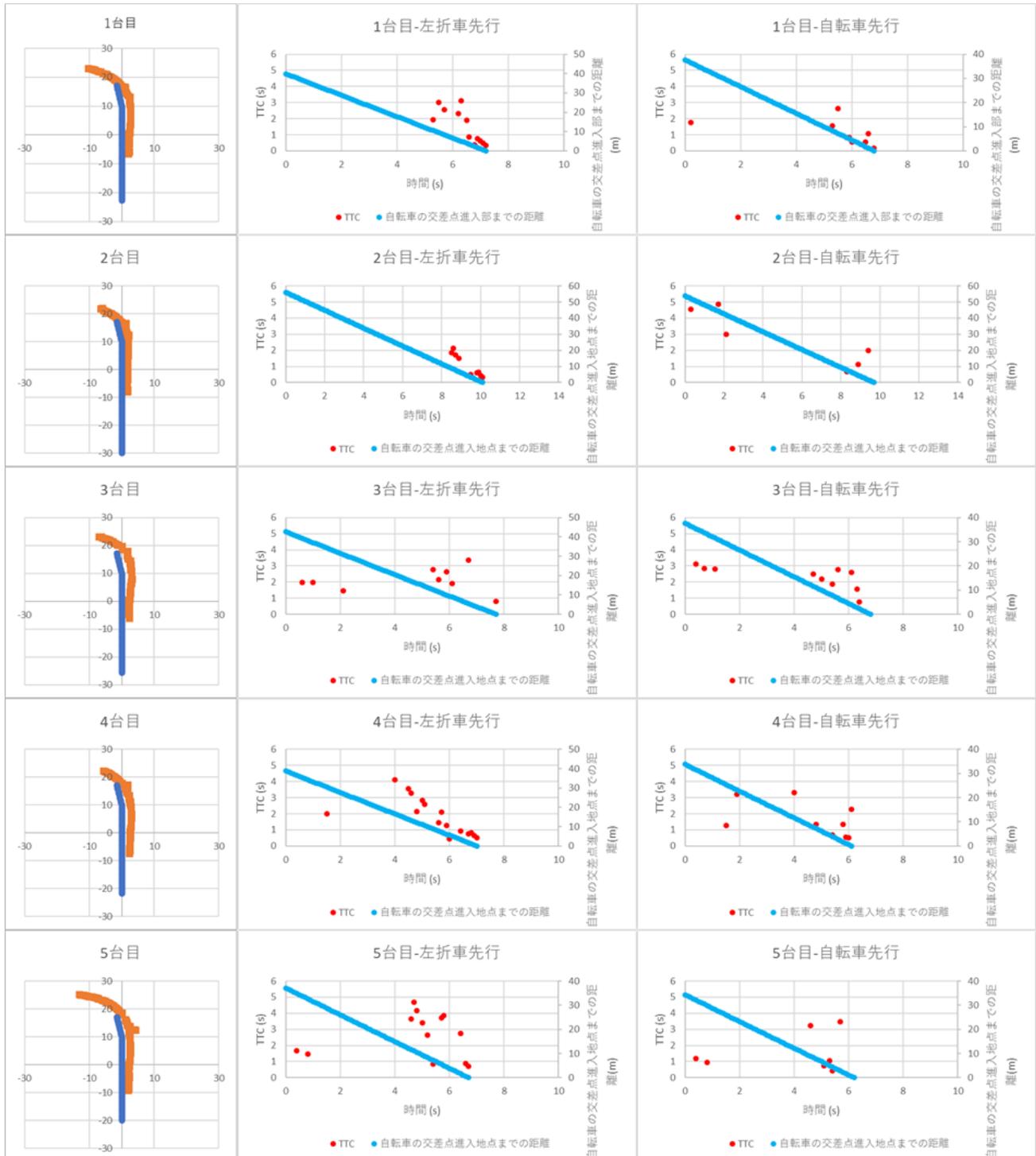


図-3.37 板橋中央陸橋交差点③地点で得られた 5 台の左折車軌跡に自転車軌跡を与え得られた TTC の時間経過毎の分布

(6) 交差点別TTCの比較

流入する自転車と左折車について、走行軌跡から最初に得られたTTCの範囲をみることで、交差点におけるリスク評価の可能性をみた(表-3.5)。その結果、②④では1.50, ①③では3.00を超えていればTTC算出可能と判断すると、志村3丁目交差点を除いてTTC算出ができていることから、交差角度が90°~100°では、TTCの直接観測が可能で、衝突余裕時間によるリスク評価も可能といえる。一方、志村3丁目では、衝突余裕時間を求めることができなかった。このことは、交差点隅角部がとくに鋭角になる場合には、危険度評価の困難な錯綜が発生する可能性があることがわかった(図-3.38)。

(7) LiDAR動的データを用いた左折車軌跡の取得

プローブ自転車が走行した状態で、リアルタイムにTTCの算定が可能か検証した。遠藤東交差点において、RTK-GNSSによって得られた自転車走行軌跡と、LiDARから得られた相対位置データを事後にRTK補正した左折車走行軌跡を図-3.39に示す。ビデオカメラとの整合の結果、自転車軌跡は概ね良好だったが、左折車には不連続な部分があり、ソフトRTK補正の精度、自転車の走行時の傾きの影響、RTK-GNSSとLiDARの時刻同期化に課題があったものと考えられる。

(8) LiDARデータ分析まとめ

本研究では、LiDARセンサによる観測データのオクルージョンや交差点条件：観測範囲に関する知見を得た(表-3.6)。センサを静止固定した状態では、LiDARにより左折車の走行軌跡を精度よく求めることができ、衝突余裕時間によるリスク評価が可能であることを確認した。

参考文献

- 1) 澤田和樹, 吉田長裕, 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, 第41回交通工学研究発表会論文集(研究論文), pp. 177-182, 2021.
- 2) 山中英生, 亀井壤史: プローブバイクを用いた車道走行自転車の安全感評価モデルの開発, 土木学会論文集D3(土木計画学), Vol. 71, No. 5 (土木計画学研究・論文集第32巻), pp. I_623-I_628, 2015.
- 3) 公益財団法人交通事故総合分析センター: 2019年度SIPパターン別の事故件数.
- 4) 山中英生, 楠瀬史浩, 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, 土木学会, 第64回土木計画学研究発表会・講演集, 6pages, 2021.

表-3.5 各交差点におけるTTCの平均値と標準偏差

観測地点	①	②	③	④
亀戸駅前	3.19 (0.10)	2.22 (0.28)	4.08 (1.05)	2.12 (0.60)
錦糸橋	5.71 (1.58)	(欠測)	3.75 (0.25)	(欠測)
遠藤東	4.01 (0.60)	3.66 (0.35)	6.46 (1.81)	5.34 (2.87)
志村3丁目 鋭角部分	-	3.09 (0.08)	3.02 (0.33)	2.23 (0.23)
志村3丁目 鈍角部分	-	-	9.94 (1.40)	16.15 (4.50)
板橋 中央陸橋	6.85 (2.43)	8.38 (4.12)	3.47 (0.25)	2.53 (0.41)

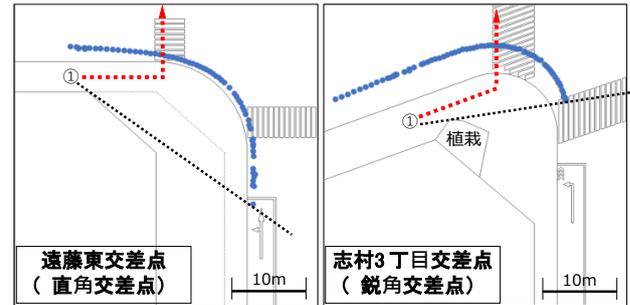


図-3.38 交差点角度における危険度評価が困難なパターン

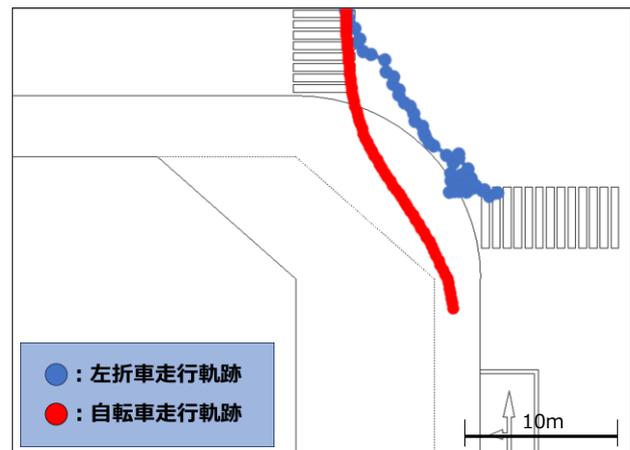


図-3.39 自転車・左折車軌跡

表-3.6 静的調査結果のまとめ

	静的調査の結果	対応策	対応アプリケーション
オクルージョン	柵, ガードレール, 立て看板, 電柱によって, 左折車と自転車間の座標, 距離が求まらずに衝突余裕時間を一時的に求めることができない	左折車と自転車両者の存在位置情報を互いに共有するためのインフラ協調システムの導入検討	スマートポール(自転車ITS実験中): 複数の通信端末をポールが通信仲介して接近情報を通知. 通信端末を持たない交通参加者であっても, ポールが通信仲介して他者接近情報を通知する)
交差点条件	交差角が鋭角の場合に, 交差方向から接近する自転車から左折車の衝突余裕時間を求められない	自転車双方通行→一方通行化, 交差点流入口の縮小による錯綜自転車の明確化	プロテクト型交差点による自転車の交差点流入制御, 左折車制御

3.3 大規模信号交差点におけるRTK-GNSS観測による動的調査

(1) 調査の目的

信号交差点において、自転車視点からの危険対象物体をリアルタイムに直接観測できるLiDARセンサやGNSSレシーバーを搭載した自転車(LiDARプローブ自転車)を用いて観測したデータを用いた解析・分析を通じLiDARセンサの実道路環境における有用性を明らかにすることを目的とする。

(2) 調査分析の方法

本研究では、図-3.40に示すLiDARセンサ、RTK-GNSS、カメラを搭載したプローブ自転車を用いて信号交差点における錯綜現象と単路部での自動車による追い越し現象の観測を行った。

GNSSレシーバーにはRTK W-band bluetooth GNSS receiver (型式: DG-PRO1RWS) を用いた。0.1秒毎に緯度経度情報などをCSV形式で取得、RTK補正を行うことで誤差2cm程度の高い精度で観測できる。取得できる項目を、表-3.7に示す。信号交差点観測においては、移動局として自転車・左折車にそれぞれ1台、そして観測精度を向上させるため基準局として1台の計3台を運用した。基準局は、図-3.41のように交差点近くの周りに高い壁などが無い地点に設置した。

a) 観測概要

自転車と左折車の錯綜現象を観測するため、LiDARプローブ自転車とRTK-GNSSを搭載した自動車を用いた。自動車は時速40km程度、モバイルプローブ自転車は時速15km程度で走行し、ほぼ同時に交差点横断帯に進入、錯綜するようコントロールし、観測を行った。また、自動車による自転車の追い越し現象を観測するため、LiDARプローブ自転車で単路部を走行した。

b) 対象交差点部・対象単路部

RTK-GNSSを用いるうえで通信状態の良し悪しが大きな影響を及ぼすと考えられるため、通信条件の良いと考えられる開けた郊外部と建物密集により通信条件の悪いと考えられる市街地の2つの信号交差点を対象とした。表-3.8に対象交差点図、所在地、観測日時、周辺環境を示す。



図-3.40 LiDARプローブ自転車

表-3.7 RTK-GNSSから得られるデータ項目と概要

データ項目	概要
time	エポックの観測日時+GMT オフセット
latitude	緯度 Dgree (傾斜補正が有効な場合補正された値)
longitude	経度 Dgree (傾斜補正が有効な場合補正された値)
altitude	標高 (傾斜補正が有効な場合補正された値)
geoidheight	ジオイド高(日本のジオイドが有効な場合日本のジオイド)
speed	速度 (m/s)
bearing	移動方位 (北 0°時計回り) (DMP または MB コンパスが有効な場合はそれで得られた方位)
fix	測位モード
used satellite	使用衛星数
horizontalAcc	推定水平精度 (m)
verticalAcc	推定垂直精度 (m)
hdop	水平 DOP
vdop	垂直 DOP
pdop	位置 DOP
speedAcc	推定速度精度 (m/s)
bearingAcc	推定方位精度 (°)

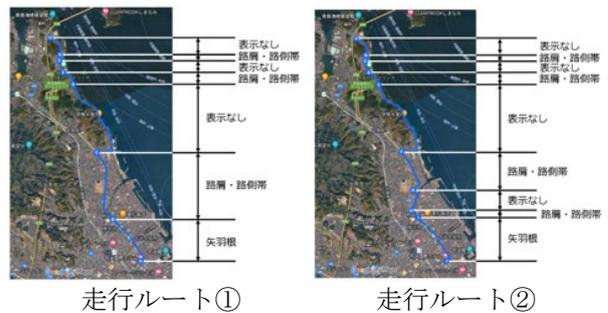


図-3.41 基準局の設置状況

表-3.8 対象交差点概要

	神宮交差点	南光坊西交差点
交差点図		
所在地	愛媛県今治市神宮	愛媛県今治市別宮町 4丁目 1
観測日	2023年12月12日 2023年12月13日	2023年12月13日
周辺環境	歩道橋があり、周辺は田畑で開けている。	2,3階建ての建造物に囲まれている。

単路部については通信条件が良く、様々な自転車通行整備形態の混在する3路線を対象とした。図-3.42にそれぞれ単路部航空写真とその区間毎の整備形態を示す。3路線とも今治国際ホテルとサンライズ糸山を結ぶルートであり、主に海岸線を進むルートと、幹線道路を進むルートに分けた。幹線道路においては、現在自転車通行整備が進んでいる最中のため、矢羽根、路肩・路側帯、表示なし等、様々な整備形態が混在している。

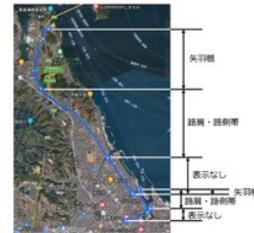


走行ルート①

走行ルート②

c) 解析手法

LiDAR観測データから捉えた左折車の点群の座標のみを0.1秒毎に図-3.43のように選択、CSVファイルとして取り出し、その中から原点（モバイルプローブ自転車）に最も近い点を抜き出し、自転車から見た左折車の相対位置を取得した。その後RTK-GNSSログデータから得た自転車軌跡を基に左折車相対位置を補正することで信号交差点観測においては左折車、走行観測において追い越し車の軌跡を得る。軌跡は、緯度経度表示を平面直角座標系に変換した。



走行ルート③

図-3.42 走行ルート図

具体的な手法としては、LiDARセンサでの観測時に使われるLiDARセンサを中心としたX、Y軸を平面直角座標系における北向き正、東向き正の軸と角度を合わせるよう θ° 回転させる、つまり左折車相対位置を θ° 回転させることで軸を一致させ、その後自転車の絶対位置に加えることで左折車の相対位置を平面直角座標系の絶対位置に変換した。LiDARプローブ自転車の北に対する進行方向角度 θ° はRTK-GNSSのログデータから得ることが出来る。

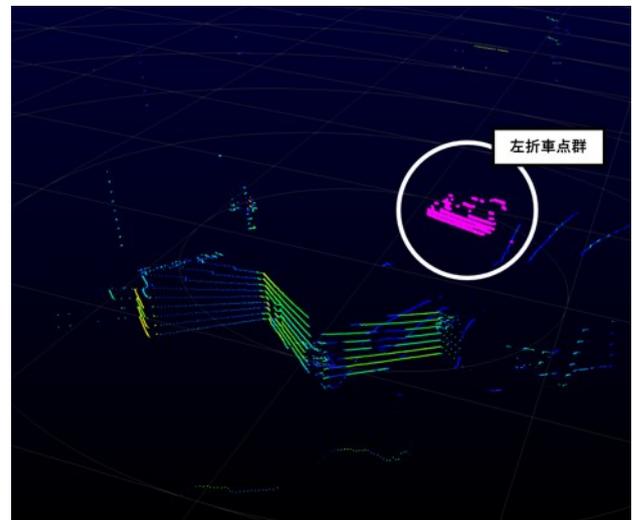


図-3.43 VeloView左折車点群

d) 分析手法

左折車と自転車の衝突の危険度を表す指標として、衝突余裕時間TTC (Time to Collision) 指標を用いる。TTCとは、速度と進行方向を維持すると仮定した場合の衝突までの時間(s)で定義される。それぞれ車両の1フレーム間 (0.1秒) の軌跡の変化から速度ベクトル算出し、設定し、その速度ベクトル同士の交点を求める。そして、そこに到達するまでに左折車・自転車それぞれがかかる時間の差と車体の全長を考慮してTTCを求めた。ここで自転車の全長を2.0m、自動車の全長を5.0mとして計算している。

交差点部において、LiDAR観測データを基に取得した左折車軌跡とRTK-GNSSログデータを基に取得した自転車軌跡を用いて算出したTTCを観測値、RTK-GNSSログデータを基に取得した自転車・左折車軌跡を用いて算出したTTCを真値として時間経過に伴うTTCの変化傾向などを比較する。

e) 観測結果

各交差点における実験錯綜観測数、各走行ルートにおける観測走行数を表-3.9に示す。LiDAR観測件数も同様である。これら複数観測のうち、神宮交差点、南光坊西交差点、走行ルート①から、それぞれ1件を選択し、解析・分析を行った。

表-3.9 各観測件数

	錯綜観測数 (件)	観測走行数 (件)
神宮交差点	25	-
南光坊西交差点	8	-
走行ルート①	-	3
走行ルート②	-	2
走行ルート③	-	2

f) RTK-GNSSトラッキング状況

GNSSトラッキングにおけるログ点数とRTK補正状況について表-3.9と図-3.44に示す。RTKの位置確定は、複数の衛星から受信アンテナまでの電波の波の数を特定し距離を正確に確定する。この値をFix解と呼ぶ。これに対して、Fix解が得られない状態をFloat解と呼び、Float解の精度は不定である。移動局が以下のような場所ではFix解は得られないか、時間を要す。

- ・ トンネルや地下
- ・ 橋や高架橋の下
- ・ 建物の中や屋根の下，外壁際
- ・ 森林など樹木の下
- ・ 溪谷やビル街など周囲に高い壁がある場所
- ・ その他，周囲の環境などの影響で十分な強度で衛星の電波を受信できない場所
- ・ 基準局から数十キロ以上離れた場所

また，以下のような基準局でもFix解が得られない。

- ・ 受信状態のよくない基準局
- ・ 既知の位置が実際のアンテナの位置とかなりずれた基準局

また，各アンテナと連携し補正情報を送受信するスマートフォン自体の通信不良によりRTK補正ができていない場合を「4G接続不良」と表現した。

表 2-1.7 GNSS観測点数(0.1秒間隔)とRTK補正状況

	全体	神宮 交差点	南光坊西 交差点	走行 ルート ①	走行 ルート ②	走行 ルート ③
観測数 (%)	181,301 (100)	45,110 (100)	11,179 (100)	59,214 (100)	35,143 (100)	30,655 (100)
Fix 数 (%)	158,965 (87.7)	43,141 (95.6)	7,587 (67.9)	56,895 (96.1)	29,782 (84.7)	21,560 (70.3)
Float 数 (%)	20,178 (11.2)	1,604 (3.6)	2,934 (26.2)	2,054 (3.5)	5,207 (14.8)	8,379 (27.3)
4G 接続不良 (%)	2,158 (1.2)	365 (0.8)	658 (5.9)	265 (0.4)	154 (0.4)	716 (2.3)



図-3.44 Fix地点全体 (左) とFloat地点全体 (右)

(3) 危険度の分析結果

a) 神宮交差点の走行軌跡

神宮交差点において観測した25件のうち1件を対象に分析を行った。RTK-GNSSデータをもとにプロットした自転車軌跡と左折車軌跡，LiDAR観測データをもとにプロットした左折車軌跡を図-3.45に示す。また，交差点と重ね合わせた図を図-3.46に示す。なお，軌跡は平面直角座標4系上にプロットされており，軸はm単位である。

RTK-GNSS左折車とLiDAR左折車の軌跡を比較すると，左折車の挙動を高い精度で観測できていることがわかる。両者のずれは，GNSSレシーバーは車両

の内部（ダッシュボード部分）に設置し車両の前方中央部分をロギングしていたのに対し，LiDAR観測データからプロットした左折車軌跡は車両の進行方向に向かって左前部分を基にプロットしていることによるものである。

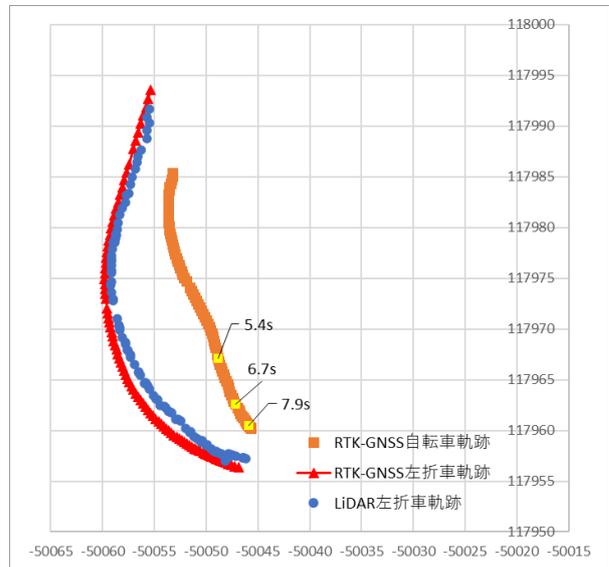


図-3.45 自転車・左折車軌跡 (神宮)

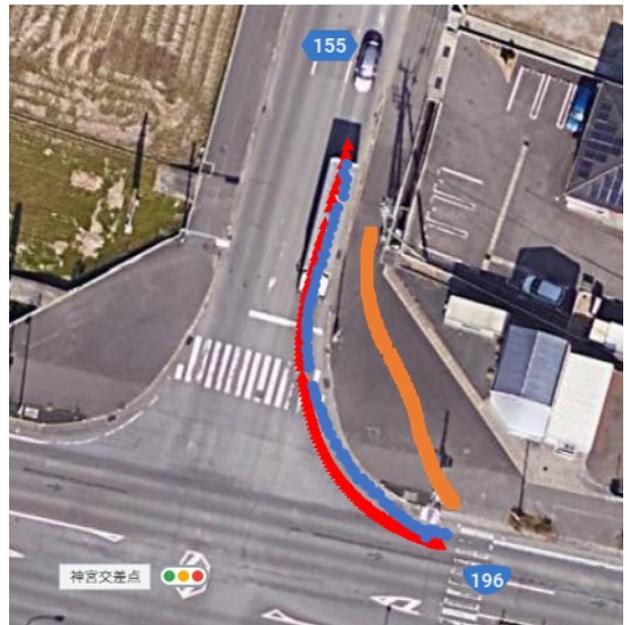


図-3.46 自転車・左折車軌跡の重ね合わせ (神宮)

b) 神宮交差点の衝突余裕時間TTC

続いてRTK-GNSS自転車軌跡とRTK-GNSS左折車軌跡を基に算出したTTC (Time to Collision) と，RTK-GNSS自転車軌跡とLiDAR左折車軌跡を基に算出したTTCを図-3.47～図-3.48に示す。なお，グラフの縦軸はTTC (s) を，横軸はLiDARセンサーが左折車を観測してから交差点に進入する直前までを0.1秒刻みで示している。

RTK-GNSS自転車軌跡とRTK-GNSS左折車軌跡から算出したTTCは計22回算出され，RTK-GNSS自転車軌跡とLiDAR左折車軌跡から算出したTTCは計4

回算出された。TTCが初めて算出されたのは、それぞれTTC算出開始から5.4秒、5.6秒、最小値が現れたのがTTC算出開始からそれぞれ6.6秒、6.1秒、最後にTTCが得られたのがそれぞれ7.9秒、7.5秒と、時間経過に伴うTTCの変化傾向は同様である。TTCが算出された回数がそれぞれの算出方法で異なるのは、RTK-GNSS左折車軌跡に比べ、LiDAR左折車軌跡の方が軌跡の精度が低いことに起因すると考えられる。具体的には、GNSSレシーバーは車内に固定していたため、車両の同じ部分の位置情報を安定した状態でトラッキングできていたのに対し、LiDARセンサによる観測では、センサを設置した自転車が行進しながら左折車の左前方部分を相対的に観測しているため、0.1秒刻みにおいてはかなりのブレが生じ、左折車の進行方向が小刻みに大きく変化しているように観測されることが原因と考えられる。連続的に滑らかな軌跡が得られていれば、自転車進行方向ベクトルと左折車進行方向ベクトルの交点も連続的に得られるため一度TTCが算出されれば、その後TTCも連続的にRTK-GNSS自転車軌跡とRTK-GNSS左折車軌跡から算出したTTCのように得られると考えられる。これに対しては、TTCの算出を0.5秒間隔に変更するなど、算出間隔を大きくすることで軌跡のブレの影響を緩和できると考えられる。

c) 南光坊西交差点の走行軌跡

南光坊西交差点において観測した8件のうち1件を対象に分析を行った。RTK-GNSSデータをもとにプロットした自転車軌跡と左折車軌跡、LiDAR観測データをもとにプロットした左折車軌跡を図-3.49に示す。また、交差点と重ね合わせた図を図-3.50に示す。なお、軌跡は平面直角座標4系上にプロットされており、軸はm単位である。

RTK-GNSS左折車軌跡とLiDAR左折車軌跡を比較すると、大まかには左折車の挙動を観測できているが、直線的に走行している部分においても軌跡にかなりのブレがみられる。軌跡同士少しずつずれがみられるが、これはLiDAR観測データから左折車軌跡を得るため補正データとして用いる自転車のRTK-GNSSログデータのほとんどがFloat解であることから補正の精度が落ちてしまったことが理由と考えられる。

d) 南光坊西交差点の衝突余裕時間TTC

RTK-GNSS自転車軌跡とRTK-GNSS左折車軌跡を基に算出したTTC (Time to Collision) と、RTK-GNSS自転車軌跡とLiDAR左折車軌跡を基に算出したTTCを図-3.51、図-3.52に示す。なお、グラフの縦軸はTTC (s) を、横軸はLiDARセンサが左折車を観測してから交差点に進入する直前までを0.1秒刻みで示している。

RTK-GNSS自転車軌跡とRTK-GNSS左折車軌跡から算出したTTCは計3回算出され、RTK-GNSS自転車軌跡とLiDAR左折車軌跡から算出したTTCは計6回算出された。TTCが初めて算出されたのは、それぞれTTC算出開始から4.1秒、0.3秒、最小値が現れたの

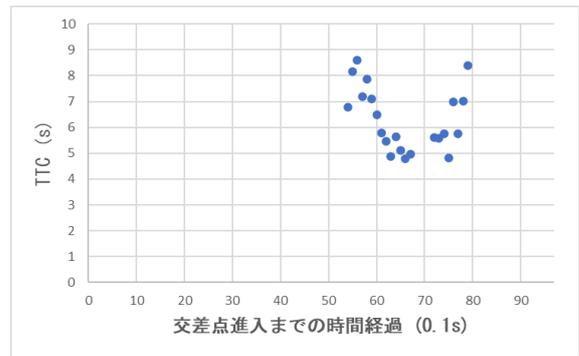


図-3.47 RTK-GNSS自転車軌跡とRTK-GNSS左折車軌跡から算出したTTC (神宮)

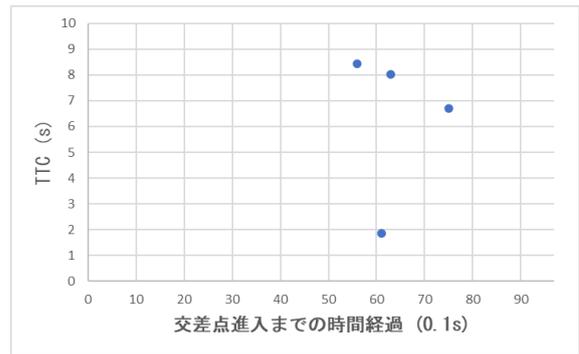


図-3.48 RTK-GNSS自転車軌跡とLiDAR左折車軌跡から算出したTTC (神宮)

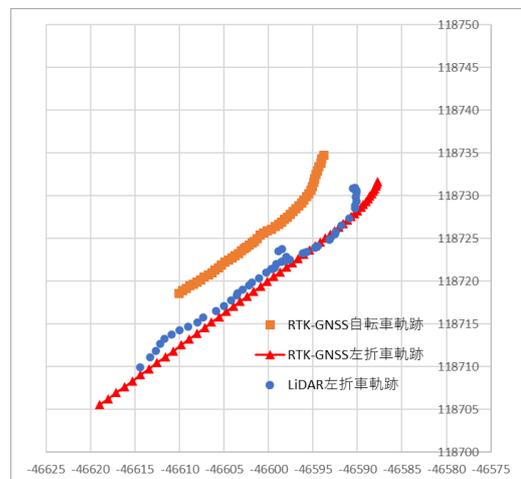


図-3.49 自転車・左折車軌跡 (南光坊西)



図-3.50 自転車・左折車軌跡重ね合わせ

がTTC算出開始からそれぞれ4.4秒,0.5秒,最後にTTCが得られたのがそれぞれ4.4秒,4.8秒と、時間経過に伴うTTCの変化傾向にかなり違いがある。TTCの算出回数、変化傾向がそれぞれの算出方法で大きく異なるのは、LiDAR左折車軌跡のブレが原因と考えられる。実際には直線的に走行している区間においても蛇行運転をしているような軌跡になっていることから、自転車進行方向ベクトルと左折車進行方向ベクトルの交点が現れるはずのない地点に現れている。これに対しても神宮交差点と同様に、軌跡のブレを低減させるため、TTCの算出を0.5秒間隔に変更するなど、算出間隔を大きくすることが有効と考えられる。

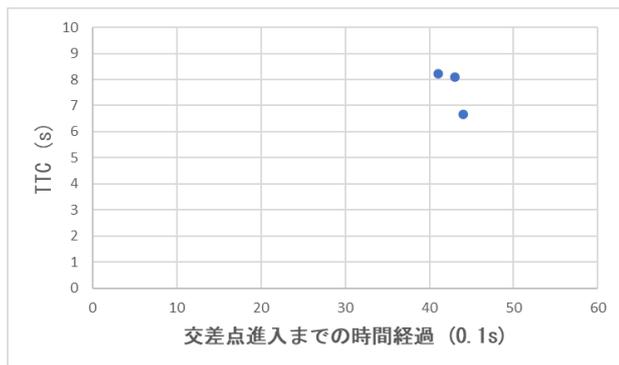


図-3.51 RTK-GNSS自転車軌跡とRTK-GNSS左折車軌跡から算出したTTC

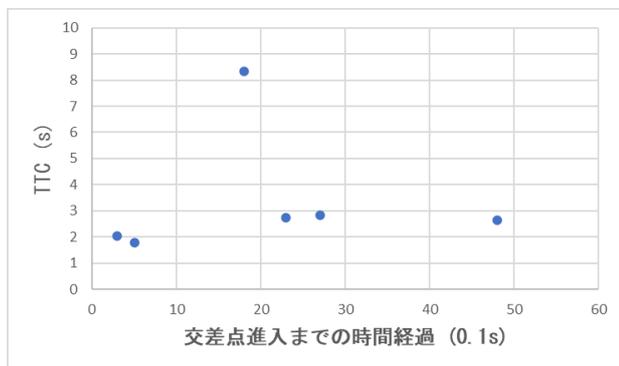


図-3.52 RTK-GNSS自転車軌跡とLiDAR左折車軌跡から算出したTTC

(4) Lidarプローブ自転車による調査結果のまとめ

本調査は昨年度から改良したLiDARプローブ自転車用いて信号交差点部においては左折車の軌跡を、単路部においては追い越し自動車の軌跡を精度よく得られるか、またその軌跡を用いたTTC算出などの分析が可能かを検証するため行った。

信号交差点部における左折車軌跡の取得とTTC算出については、全観測のうち各交差点につき1件ずつ分析を行った結果、RTK-GNSSについては、通信環境の良い地点を選択したこと、また基準局を設置したことによりかなり精度高くログデータを取得できた。LiDARセンサについてはハンドルの回転に影響を受けない位置に取り付けたこと、またその位置が地面に近いことで車体傾きの影響も低減できたことから昨年度と比較して安定した観測ができたといえる。

分析においては、GNSSレシーバーの通信条件の良い神宮交差点でのLiDAR観測データを用いた左折車の走行軌跡の取得、TTCの算出とともにRTK-GNSSログデータのみを用いて算出したものと比較して同様の挙動、傾向がみられた。このことから、GNSSのRTK補正が十分に行える自転車走行位置の座標精度が高い環境においては、LiDARセンサとの組み合わせによって錯綜現象の直接観測が可能であることが分かった。

一方、0.1秒間隔でのTTC算出を行うと、座標の小さな変化の影響により、TTCの算出が連続的にできないことがわかった。これに対しては、衝突余裕時間を使った通知を行う場合には、その精度と適用範囲を考慮し、例えば得られたLiDAR観測データの3フレームの平均を用いるといったように、TTCの算出間隔を工夫することで、より実際の現象に即したTTCが得られると考えられる。

第4章 協調型ドライビングシミュレータ (DS) を使用した協調行動実験

4.1 シミュレータシステムの再現性検証実験

(1) はじめに

シミュレータといえば自動車の挙動等を再現可能なドライビングシミュレータ(以下,DS)が主流であったが、自転車の挙動等を再現可能なサイクリングシミュレータ(以下,CS)も登場し活用されるようになってきた。それに伴い、国内外でDS,CSの基礎的な精度検証、走行特性の評価、研究開発が行われている。DSに関しては、Hallvig et alやAim et alが走行速度、速度変動の差異、Aim et alやWang et alが横方向移動、車線移動の差異、Philip et al, Davenne et alが車線からの逸脱傾向などの差異を検討しており、基礎的なものの他にも様々な精度検証、走行特性の評価などがなされている。CSに関しては、HMD型とスクリーン型に大別され、HMD型のCSに関してはSteve O' Herm et alが平均速度、側方距離等の差異を検証している。スクリーン型のCSに関しては、溝口らが速度、前方車間距離、側方距離、サイン判読距離などの差異を検証している。また、櫻井が平均速度、複雑な曲線環境下での旋回挙動などを評価している。CSはDSと比べて、再現性などの検討は基礎的なものに留まっている。本研究で活用する全方位視野タイプ協調型シミュレータ(CCS)の走行特性の評価などは、まだ十分にされていない。

本章では、自転車道の自動車と自転車が混在した交通流を様々な条件下で再現できるCCSの走行特性を把握し、高精度のCCSを作成するためにCCSの基礎的な走行特性を評価するため、以下の実験を行う。

1. CCSにおける自転車追越し時の走行特性の把握
2. 夜間における路上駐車車両追越し時のCS走行特性の把握

(2) CCSによる走行実験 (CCS実験)

CCS実験では、実験装置として、HMDを活用した全方位視野型の協調型シミュレータ(以下,CCS)を使用した。HMDはFacebook Technologies, LLC製のOculus Rift Sを使用している。CCSは図-4-2.2に示す

DSとCSで構成されている。またソフトウェアに関しては株式会社フォーラムエイト製のUC-win/Road version14.2.1を使用した。このソフトウェアを使用することで、実際の道路や交通環境などを再現できるほか、実験の目的に応じた走行シナリオを柔軟に作成可能である。本研究ではこのソフトウェアで文教大学湘南キャンパスの外周路を再現している。



図-4.1 CCSの外観

(3) CCS・実走実験の概要

a) 実験手続き

初めに、実験開始前のインフォームドコンセントにおいて、全実験参加者に対し、1) 実験により生じる実験参加者への不利益、2) プライバシーへの配慮、3) 実験に参加しない自由の確保、に関して十分な説明を行い、実験に参加することへの同意を得た。また、実走実験については運転操作に慣れること、CCS実験については、シミュレータ環境および運転操作に慣れることを目的として、自動車側 (DS側)、自転車側 (CS側) の実験協力者、それぞれに練習走行を実施した。走行に際して以下のように教示を行った。

- ・ DS教示
 - ・ ゲーム感覚で運転するのではなく、実際の自動車を走行するように運転して下さい。
 - ・ 安全運転を心掛けて下さい。

- ・ 具合が悪くなった場合は、走行中でもすぐに申し出て下さい。
- ・ 速度計が装備されているので、30km/hで走行して下さい。
- ・ 「お願いします」と言ったら走行を始めて下さい。
- ・ CS教示
- ・ ゲーム感覚で運転するのでなく、実際の自転車を走行するように運転して下さい。
- ・ 安全運転を心掛けて下さい。
- ・ 具合が悪くなった場合は、走行中でもすぐに申し出て下さい。
- ・ 速度計が装備されているので、15km/hで走行して下さい。
- ・ 15km/hの速度感覚が掴めたらお知らせ下さい。
- ・ お願いしますと言ったら走行を始めて下さい。

実走実験については、自動車側は運転操作に慣れたこと、自転車側は通常の自転車で走行する際と相違ないと被験者から報告を受け、実験従事者が習熟を十分と判断した後、実験走行を開始した。

CCS実験については、シミュレーション環境下での感覚が、実道路と相違ないと被験者から報告を受け、実験従事者が実験協力者の習熟が十分と判断した後、実験走行を開始した。実験の所要時間は、CS・DS各1名の1組あたり約1時間半であった。

b) 実走実験のシナリオ

実走実験は、文教大学内の外周路で行った。走行シナリオはプローブ自転車を自動車(トヨタ ヤリス)で所定の追越し区間で自転車を追越すというものにした。追越し区間は図-4.2に示す通りでコースの全長は92.20mである。また、指示速度はプローブ自転車が15km/h、自動車が30km/hとした。この速度差を考慮して、自動車と自転車の走行開始位置を決定した。実験の様子は図-4.3に示す通りである。



図-4.2 追越し区間 (航空写真)



図-4.3 実験の様子

c) CCS実験のシナリオ

CCS実験は、シミュレータ環境下で文教大学の外周路を再現したコースで行った(図-4.4)。実験条件が同じになるよう、追越し区間の長さや走行開始位置も実走実験と同一にしている。実験の様子は図-4.5、図-4.6、図-4.7に示す通りである。



図-4.4 追越し区間 (CCS)



図-4.5 実験の様子



図-4.6 実験の様子 (自動車側)



図-4.7 実験の様子 (自転車側)

d) 練習走行・実験走行

実走実験では、プローブ自転車と自動車での走行に慣れることを目的として練習走行をリングロードにて行った。特にプローブ自転車に関しては、自転車のふらつきの程度が大きくなるとLidarから正しく点群データが出力されないことがあったため、被験者がある程度なれた時点で実験従事者がふらつき

の程度が許容範囲内であるか確認し、終了とした。

CCS実験では、自転車、自動車どちらもシミュレーションに慣れることを目的として練習走行を実験シナリオで行った。被験者がシミュレータ環境下での運転操作や速度感に慣れたところで練習走行を終了とした。

なお、実走実験、CCS実験ともに、文教大学内の外周路の追越し区間内での追越し実験を各5回行った。また、プローブ自転車は15km/h、自動車は30km/hで走行するように被験者に教示し、速度統制をして、実験を実施した。

e) 評価指標

評価指標は、LC（離隔距離の最小値）と相対速度とする。Marco Dozza et alを参考にし、自動車の自転車追越し挙動を4つのフェーズに分類する。CCSとVLP-16を搭載したプローブ自転車の走行データをpassingフェーズ（図-4.8）で比較する。passingフェーズは追越し車両の車両前部が自転車の後方3m以内に到達した時点から、追越し車両の車両後部が自転車の前方3m以上前に出た時点までとする。

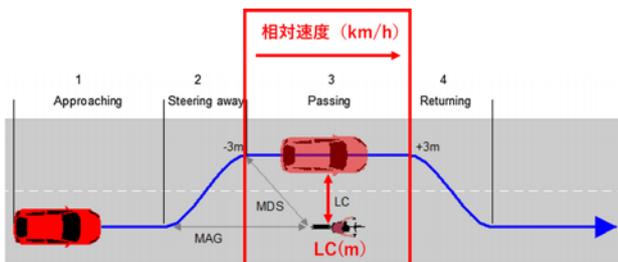


図-4.8 追越し挙動の評価指標の概念図

f) 実験参加者

表-4.1に示すように、DS側の被験者は20代の男性8名であった。表-4.2に示すようにCS側の被験者は20代の男性・女性8名であった。

表-4.1 DS被験者の属性

	性別	年齢	視力		矯正	運転頻度
			右	左		
DS	男	23	右(1.0)	左(1.2)	裸眼	めったに利用しない
	男	22	右(1.0)	左(1.0)	眼鏡・コンタクト	めったに利用しない
	男	22	右(0.9)	左(0.9)	眼鏡・コンタクト	めったに利用しない
	男	23	右(1.2)	左(0.9)	眼鏡・コンタクト	週に1~2回程度乗車
	男	22	右(1.0)	左(1.0)	裸眼	ほぼ毎日乗車
	男	22	右(1.0)	左(1.0)	眼鏡・コンタクト	週に1~2回程度乗車
	男	22	右(1.5)	左(1.0)	裸眼	2~3ヶ月に1回程度乗車
	男	22	右(1.5)	左(1.5)	裸眼	週に1~2回程度乗車

表-4.2 CS被験者の属性

	性別	年齢	視力		矯正	運転頻度
			右	左		
CS	女	22	右(1.0)	左(1.0)	眼鏡・コンタクト	2~3ヶ月に1回程度乗車
	男	22	右(1.5)	左(1.5)	裸眼	週に1~2回程度乗車
	男	22	右(1.0)	左(1.0)	裸眼	めったに利用しない
	男	22	右(1.0)	左(1.0)	眼鏡・コンタクト	月に1回程度乗車
	男	22	右(1.5)	左(1.0)	裸眼	2~3ヶ月に1回程度乗車
	男	23	右(0.6)	左(0.6)	裸眼	週に3~4回程度乗車
	男	23	右(1.0)	左(1.2)	裸眼	月に1回程度乗車
	女	21	右(0.7)	左(0.7)	裸眼	めったに利用しない

(4) 実験結果

実走実験、CCS実験で8組（16名）の被験者に協力をお願いし、40回の走行を行った。このデータから

相対速度LCを算出した。

a) 相対速度

第3層(passingフェーズ)の相対速度を図-4.9に示す。実験の結果は実走が15.6km/h（標準偏差:1.43）、CCSが18.2km/h（標準偏差:5.14）となった。また、実走とCCSの間で有意な差がある（ $T(39)=3.11, p<0.01$ ）ことが分かる。

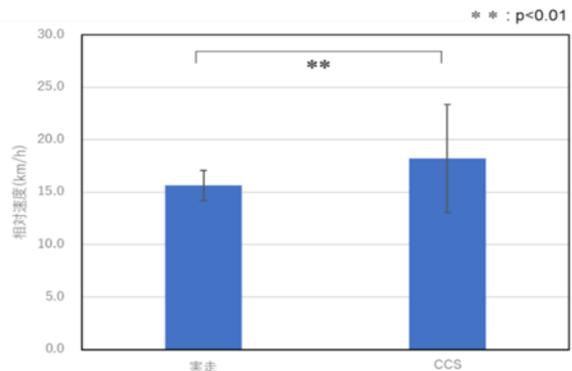


図-4.9 相対速度(km/h)

b) 離隔距離

第3層(passingフェーズ)の相対速度を図-4.10に示す。実験の結果は実走が1.65m（標準偏差:0.42）、CCSが1.96m（標準偏差0.73）となった。また、実走とCCSの間で有意な差がある（ $T(39)=3.57, p<0.01$ ）ことが分かる。

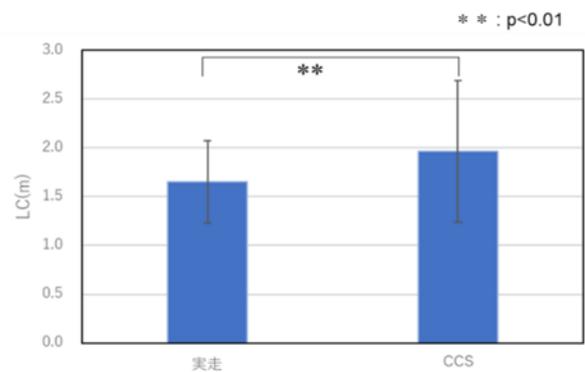


図-4.10 LC(m)

c) 主観評価

実験後に行ったアンケートは、自転車と自動車の実験参加者にそれぞれどれくらい危険を感じたのかを4件法のアンケートで評価した。集計結果を図-4.11に示す。この図から、自動車と自転車両方とも実走の方が危険感を感じていることが分かった。また、危険感の割合を図-4.12に示す。この図から実走は自転車と自動車ではほぼ同じ割合だが、CCSの自転車では全く危険を感じないことが分かった。危険感のアンケート結果をもとに実走とCCSで対応のあるt検定を行った。自転車が $t(7)=1.394, p=0.205$ 、自動車が $t(7)=-0.518, p=0.619$ であることから、両方とも実走とCCS間での有意差は見られなかった。

NASA-TLXの集計結果を図-4.13に示す。この結果から自転車の実走は身体的の値が一番大きい。また、自動車側の実走は、知的・知覚と身体的の値が大きく、CCSはタイムプレッシャーの値が大きいことが見て取れる。また、自転車の知的・知覚は実走とCCSで対応のあるt検定を行った結果、 $t(7)=2.364, p=0.032$ となった。このことから自転車の知的・知覚の値は、実走とCCSで統計的に有意な差があるといえる。

図-4.13, 図-4.14の集計結果を図-4.15に示す。この図より、実走、CCSともに自転車、自動車での作業負荷にほとんど差は見られなかった。WWLスコアの結果に対してt検定を行った。自転車が $t(7)=2.058, p=0.078$ 、自動車が $t(7)=-0.052, p=0.959$ であることから、両方とも実走とCCS間での有意差は見られなかった。

(5) まとめ

CCSの再現性実験では、文教大学内の外周路を模擬したシナリオを作成し、実際の道路とシミュレーション化の環境で、自転車を自動車が追い越す実験を行い、自動車の自転車追越し時のPassingフェーズにおける離隔距離および相対速度で比較を行った。また、実験後に危険感および作業負荷に関するアンケートを行った。これらの結果から以下のような知見を得ることが出来た。

1. 離隔距離に関しては、CCSの方が31cm長くなる
2. 相対速度に関しては、CCSの方が0.72m/s早くなる
3. 被験者の危険感に関しては、CCSの方が低くなる傾向にある
4. 自転車、自動車の作業負荷に関しては、大きな差が認められない

これらの結果から、主観評価に関しては実走、CCSでの大きな乖離が認められるが、走行軌跡の結果に関しては、既存の研究と比較しても許容できる範囲であると考えられる。今後は、交差点内での再現性のチェックやProtected Intersection等新たな交差点設計、自転車用信号等の導入効果等交差点内の錯綜時の評価等、実務に役立つ研究に昇華させる予定である。

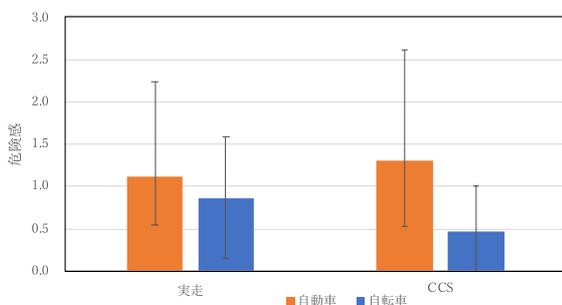


図-4.11 危険感の比較

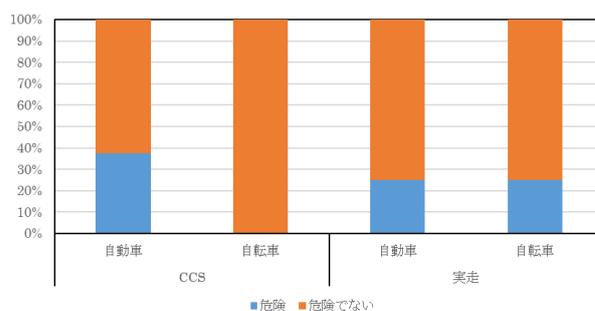


図-4.12 危険感の割合

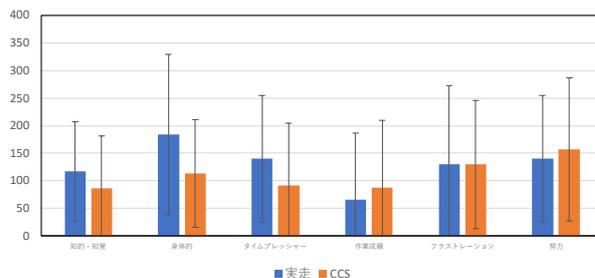


図-4.13 自転車側のNASA-TLX集計結果グラフ

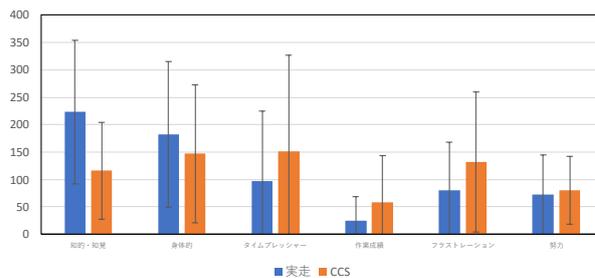


図-4.14 自動車側のNASA-TLX集計結果グラフ

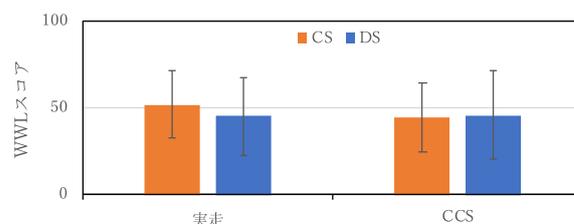


図-4.15 WWLスコアの比較

4.2 夜間におけるシミュレータシステムの再現性検証実験

(1) はじめに

自転車の交通安全に関する研究では、昼間の走行環境に関する試みが多くなされている一方、夜間の環境下での知見は昼間と比べて多くない。既存の研究では、夜間における自転車の視認性に関する研究は多くなされているが、自転車の挙動に着目した研究は少ない。本研究では夜間における路上駐車車両の追い越し挙動を検証する。また、実走・CS間での離隔距離の知覚・操作性能の違いを評価することで、夜間におけるCSの走行特性を把握し、走行再現性の

向上に向けた基礎データとする。

(2) 実験概要

実験開始前のインフォームドコンセントにおいて、全実験参加者に対し、1) 実験により生じる実験参加者への不利益、2) プライバシーへの配慮、3) 実験に参加しない自由の確保、に関して十分な説明を行い、実験に参加することの同意を得た。実験シナリオでは、実走、CSともに左車線側に寄せるようにして車両を設置した。実験シナリオの詳細は図-4.16に示す通りである。

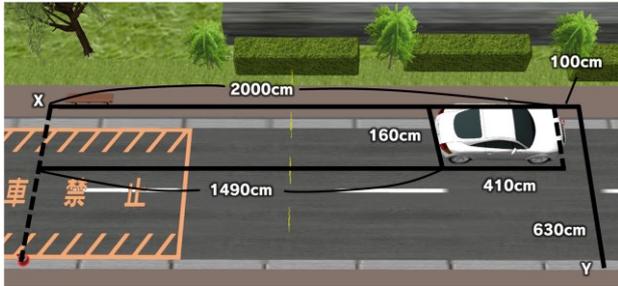


図-4.16 実験シナリオ

a) 練習走行

実験環境での走行に慣れることを目的として、練習走行コースを使用して走行を行った。運転操作や実験環境下での距離感や速度感を覚えさせるため、5~10分間の走行を各実験参加者に1回行い、実験従事者が実験参加者の練習が十分と判断した後、終了した。走行に際して、以下のような教示を行った。

●実走

- ・ 実際の車道を走行するように運転して下さい。
- ・ 安全運転を心掛けて下さい。
- ・ 具合が悪くなった場合は、走行中でもすぐに申し出て下さい。
- ・ 速度メーターで確認し、時速12km/hで走行するように心掛けて下さい。
- ・ 「お願いします」と言ったら走行を始めて下さい。

●CS教示

- ・ ゲーム感覚で運転するのではなく、実際の自転車を走行するように運転してください。
- ・ 安全運転を心掛けて下さい。
- ・ 具合が悪くなった場合は、走行中でもすぐに申し出て下さい。
- ・ 時速12km/hで走行するように心掛けて下さい。
- ・ 「お願いします」と言ったら走行を始めて下さい。

b) 本実験走行

本実験では、駐車車両との距離を1m、速度12km/hで追い越すように指示した。実走、CSともにハザードランプ無と有で1走行ずつ、計4回の走行を実施した。また、走行実験の順序は、順序効果を抑制するために各実験参加者でランダムとした。走行に際して、以下のような教示を行った。

●実走

- ・ 実際の車道を走行するように運転して下さい。
- ・ 安全運転を心掛けて下さい。
- ・ 具合が悪くなった場合は、走行中でもすぐに申し出て下さい。
- ・ 時速12km/hで走行するように心掛けて下さい。
- ・ 追い越す際は、1m程度自動車から距離をとるように心掛けて下さい。
- ・ 「お願いします」と言ったら走行を始めて下さい。

●CS教示

- ・ ゲーム感覚で運転するのではなく、実際の自転車を走行するように運転してください。
- ・ 安全運転を心掛けて下さい。
- ・ 具合が悪くなった場合は、走行中でもすぐに申し出て下さい。
- ・ 時速12km/hで走行するように心掛けて下さい。
- ・ 追い越す際は、1m程度自動車から距離をとるように心掛けて下さい。
- ・ 「お願いします」と言ったら走行を始めて下さい。

c) 実走実験環境

実験機材として、プローブ自転車(図-4.17)を用いた。自転車前方に設置した速度メーターで速度を算出し、後方に設置した超音波センサで、駐車車両を追い越す際の離隔距離を算出した。実走実験の実験風景を図-4.18に示す。



図-4.17 プローブ自転車

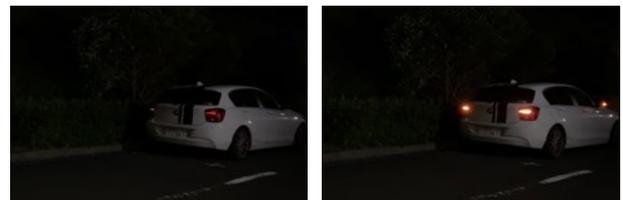


図-4.18 実走実験 ハザードランプ

d) CS実験環境

CS実験に関しては、実験機材として、CSおよびHMD(図-4.19)を用いた。ソフトウェアは株式会社フォーラムエイト製のUC-win/Road version14.2を使用した。このソフトウェアを活用することで、道路

や交通環境，走行シナリオが柔軟に作成可能である．生成された走行環境を反復して再現することも可能である．実験中には，CS環境下でのペダル，ブレーキからの各種入力値や，ハンドル挙動，周辺を走行する車両の挙動も併せて取得可能である．実走実験の実験風景を図-4.20に示す．



図-4.19 CSおよびHMD



図-4.20 CS実験 ハザードランプ

e) 解析方法

実走，CSともに駐車車両の全長420cm間を解析区間とし，その区間における速度と離隔距離の平均値を算出して比較した．解析区間の詳細を図-4.21に示す通りである．

また，実験後アンケートとして計3問の質問をした．1つ目は，1m程度の距離で走行することは，どのくらい難しいと感じましたかという質問に対し，0：「簡単だった」1：「やや簡単だった」2：「やや難しかった」3：「難しかった」とした（図-4.22）．2つ目は，走行してみて，どの程度危険だと感じましたかという質問に対し，0：「危険と感じなかった」1：「やや危険と感じなかった」2：「やや危険と感じた」3：「危険と感じた」とした（図-4.23）．3つ目は，今回の走行で自動車を追い越す際，どのくらいの距離を離れていたと感じましたかという質問に対し，「1m以下」「1m程度」「1m以上」の3つの中から1つを選択し，実際の離隔距離と比較した．なお，この質問項目に関しては，Alexらの研究を参考にした．なお，これらの評価項目はすべて一元配置の分散分析を行った後，Scheffeの多重比較法を行った．

(3) 実験結果

a) 平均速度

実走，CSの平均速度を比較した結果を図-4.24に示す．走行データのサンプル数は40である．実走の平均速度が12.2km/h(標準偏差0.6)だったのに対し，

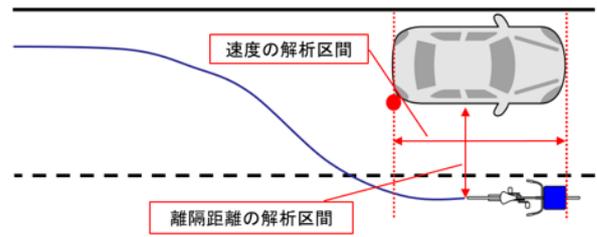


図-4.21 解析区間

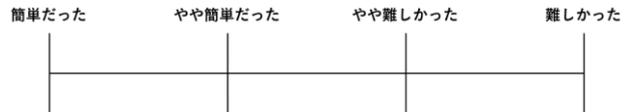


図-4.22 実験後アンケート 難易度

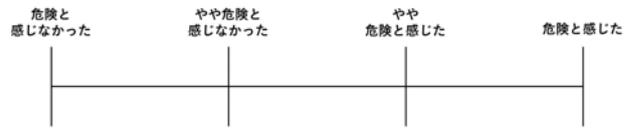


図-4.23 実験後アンケート 危険感

e) 実験参加者の属性

表-4.3に示すように本実験の参加者は，19歳～22歳の男子学生14名，女子学生6名の計20名であった．

表-4.3 実験参加者の属性

ID	年齢	性別	視力		自転車運転頻度	
			右	左		
A	22歳	男性	裸眼	右:1.0	左:1.0	週に3~4回程度乗車
B	22歳	女性	眼鏡・コンタクト	右:1.0	左:1.0	月に1回程度乗車
C	22歳	男性	裸眼	右:1.0	左:1.0	ほぼ毎日乗車
D	22歳	男性	眼鏡・コンタクト	右:0.9	左:0.7	月に1回程度乗車
E	22歳	男性	眼鏡・コンタクト	右:1.0	左:1.2	めったに利用しない
F	22歳	男性	裸眼	右:1.0	左:1.2	月に1回程度乗車
G	22歳	男性	眼鏡・コンタクト	右:1.0	左:1.0	週に1~2回程度乗車
H	22歳	女性	眼鏡・コンタクト	右:1.0	左:1.0	週に1~2回程度乗車
I	21歳	男性	裸眼	右:1.0	左:1.0	月に1回程度乗車
J	21歳	女性	眼鏡・コンタクト	右:1.0	左:1.0	ほぼ毎日乗車
K	19歳	男性	眼鏡・コンタクト	右:1.5	左:1.5	週に1~2回程度乗車
L	20歳	男性	眼鏡・コンタクト	右:1.0	左:1.0	めったに利用しない
M	21歳	男性	裸眼	右:1.5	左:1.5	月に1回程度乗車
N	20歳	男性	裸眼	右:1.5	左:1.5	ほぼ毎日乗車
O	21歳	男性	裸眼	右:1.0	左:1.0	月に1回程度乗車
P	21歳	男性	眼鏡・コンタクト	右:0.7	左:0.7	ほぼ毎日乗車
Q	21歳	女性	眼鏡・コンタクト	右:0.5	左:1.0	めったに利用しない
R	21歳	女性	裸眼	右:0.7	左:0.7	めったに利用しない
S	21歳	女性	眼鏡・コンタクト	右:1.0	左:1.0	週に1~2回程度乗車
T	22歳	男性	眼鏡・コンタクト	右:1.0	左:1.0	月に1回程度乗車

CSは12.6km/h(標準偏差1.1)であった．この結果をt検定にかけたが，統計的に有意な差はなかった($t(78)=1.54, p=0.13$)．

また，ランプの有無で比較した結果を図-4.25に示す．走行データのサンプル数は20である．実走のランプ無が12.3km/h(標準偏差0.5)，実走のランプ有が12.1km/h(標準偏差0.5)，CSのランプ無が12.5km/h(標準偏差1.1)，CSのランプ有が12.5km/h(標準偏差1.1)であった．この結果を分散分析にかけた結果，すべての条件で有意な差はないことがわかった($F(3.76)=0.96, p=0.42$)．

b) 平均離隔距離

実走，CSの駐車車両からの平均離隔距離を比較し

た結果を図-4.26に示す。走行データのサンプル数は40である。実走の平均離隔距離が93.6cm（標準偏差29.1）だったのに対し、CSは118.1cm（標準偏差34.0）であった。t検定の結果、有意差があった（ $t(78)=3.46, p=0.0009$ ）。

また、ランプの有無で比較した結果を図-4.27に示す。走行データのサンプル数は20である。実走のランプ無が91.7cm（標準偏差29.0）、実走のランプ有が95.6cm（標準偏差29.9）、CSのランプ無が112.3cm（標準偏差34.2）、CSのランプ有が124.0cm（標準偏差33.5）であった。この結果を分散分析にかけ、分散分析表にしたものを表-3に示す。これにより実走のランプ無とCSのランプ有の間で有意な差があった（ $F(3.76)=4.47, p=0.01$ ）。

c) 主観評価：難易度

実走、CSの平均値を比較した結果を図-4.28に示す。サンプル数は40である。実走の平均値が1.3（標準偏差0.9）だったのに対し、CSは1.4（標準偏差0.9）であった。この結果をt検定にかけたが、統計的に有意な差はなかった（ $t(78)=0.77, p=0.44$ ）。

また、ランプの有無で比較した結果を図-4.29に示す。サンプル数は20である。実走のランプ無が1.3（標準偏差0.9）、実走のランプ有が1.2（標準偏差0.9）、CSのランプ無が1.5（標準偏差0.9）、CSのランプ有が1.3（標準偏差0.9）であった。この結果を分散分析にかけた結果、すべての条件で有意な差はないことがわかった（ $F(3.76)=0.32, p=0.81$ ）。

d) 主観評価：危険感

実走、CSの平均値を比較した結果を図-4.30に示す。サンプル数は40である。実走の平均値が1.0（標準偏差0.8）だったのに対し、CSは1.0（標準偏差0.9）であった。この結果をt検定にかけたが、統計的に有意な差はなかった（ $t(78)=0.11, p=0.91$ ）。

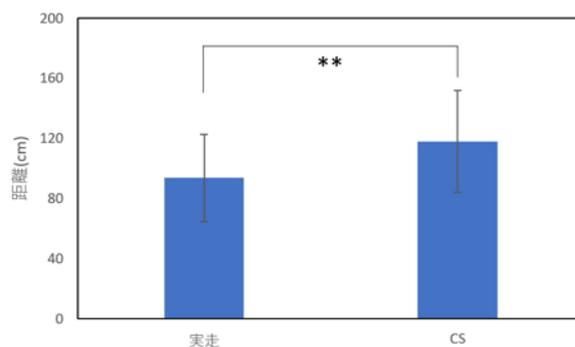


図-4.26 平均離隔距離

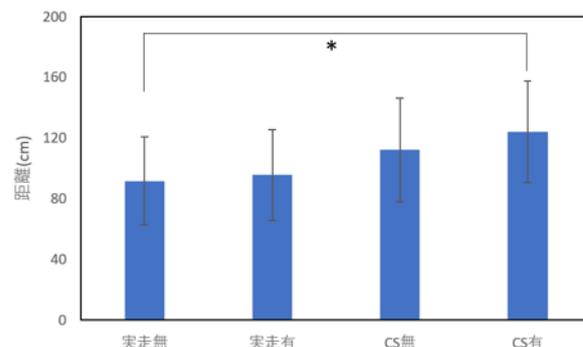


図-4.27 平均離隔距離 ハザードランプ有無

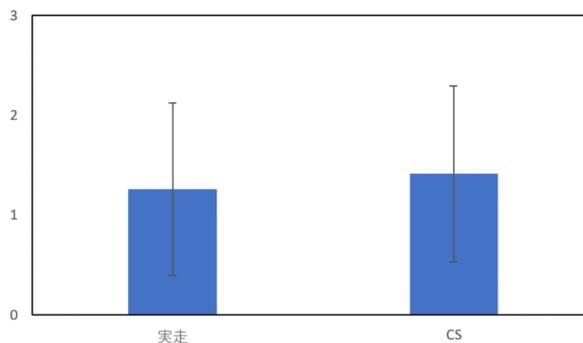


図-4.28 難易度

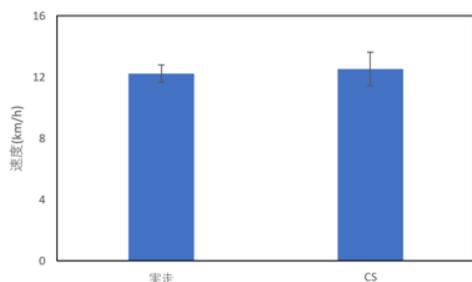


図-4.24 平均速度

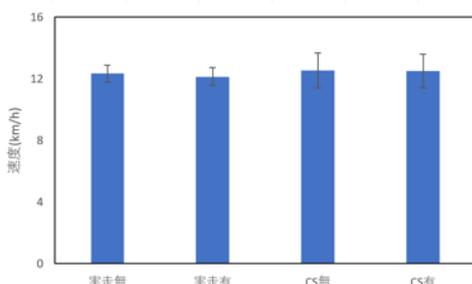


図-4.25 平均速度 ハザードランプ有無

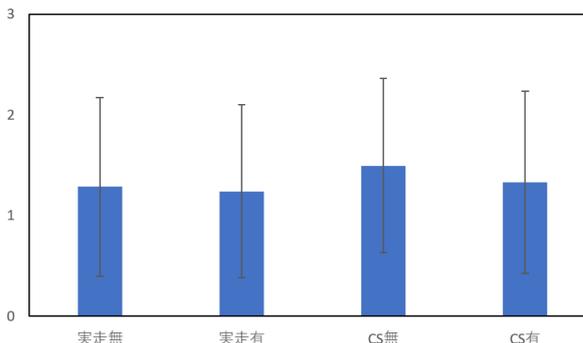


図-4.29 難易度 (ハザードランプ有無)

また、ランプの有無で比較した結果を図-4.31に示す。サンプル数は20である。実走のランプ無が1.1（標準偏差0.8）、実走のランプ有が1.0（標準偏差0.7）、CSのランプ無が1.1（標準偏差0.9）、CSのランプ有が1.0（標準偏差0.8）であった。この結果を分散分析にかけた結果、すべての条件で有意な差はないことがわかった（ $F(3.76)=0.08, p=0.97$ ）。

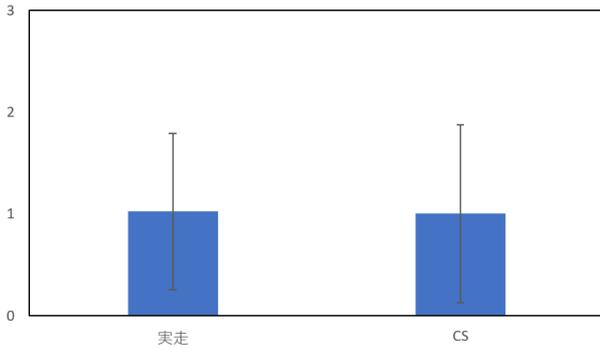


図-4.30 危険感

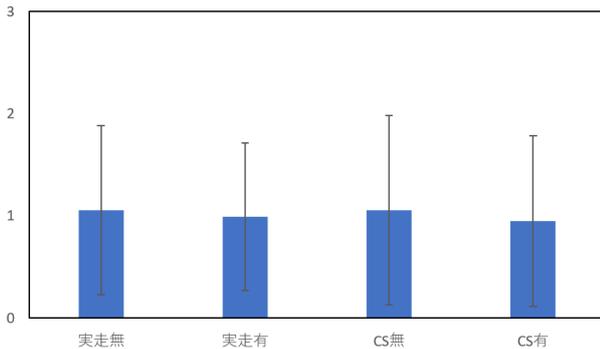


図-4.31 危険感 (ハザードランプ有無)

(4) 実験結果の分析

a) 難易度に関する分析

1mの距離を保ち追い越す走行に関する難易度について重回帰分析を行った。実走の結果を表-4.4, CSの結果を表-4.5に示す。その結果、実走はCSよりも速度の影響が大きく、またCSは実走よりもハザードランプの影響が大きかった。

b) 危険感に関する分析

危険感について、0:「危険と感じなかった」1:「やや危険と感じなかった」2:「やや危険と感じた」3:「危険と感じた」を0~1.5以下と1.5以上で「安全」、「危険」分類し、速度、離隔距離、難易度、ハザードダミーの関係を二項ロジスティック回帰分析にて、モデル化を行った。実走の結果を表-4.6, CSの結果を表-4.7に示す。実走、CSともに難易度の影響が大きく、CSではより顕著に表れた。これらの結果に関する解釈は、今後深い考察を行う必要があるが、夜間における走行における実走、CSでの特性を把握する基礎的なデータとして発展することを期待する。

(5) まとめ

シミュレータを用いた夜間の走行実験に関しては、実際の道路およびそれを模擬したシミュレーション環境にけるシミュレーション実験での比較を行った。この結果、本実験の環境下に限定はされるが以下のような結果が得られた。

1. 夜間におけるシミュレータと実走において、平均速度、離隔距離に有意な差がない

表-4.4 難易度の重回帰分析 (実走)

	β	t	有意確率
(定数)	1.434	0.675	0.504
速度	-0.078	-0.471	0.640
離隔距離	-0.001	-0.318	0.752
危険感	0.865	7.007	0.000
ハザードダミー	3.E-4	-0.002	0.999
R		0.781	
R ²		0.610	
n		40	

表-4.5 難易度の重回帰分析 (CS)

	β	t	有意確率
(定数)	0.108	0.850	0.933
速度	4.E-4	-0.004	0.997
離隔距離	0.006	1.860	0.071
危険感	0.698	5.694	0.000
ハザードダミー	-0.160	-0.791	0.434
R		0.738	
R ²		0.545	
n		40	

表-4.6 危険感の二項ロジスティック回帰分析 (実走)

説明変数	偏回帰係数	オッズ比	P 値	判定
速度	0.510	1.666	0.609	
離隔距離	-0.005	0.995	0.812	
難易度	3.066	21.462	0.005	
ハザードダミー	0.387	1.473	0.720	
定数項	-11.409	0.000	0.378	
決定係数	Cox-Snell		Nagelkerke	
	0.469		0.666	
回帰式の有意性	<0.001			
判別率	82.5%			

表-4.7 危険感の二項ロジスティック回帰分析 (CS)

説明変数	偏回帰係数	オッズ比	P 値	判定
速度	-0.426	0.653	0.466	
離隔距離	-0.065	0.937	0.043	
難易度	6.343	568.574	0.009	
ハザードダミー	2.241	9.407	0.122	
定数項	1.959	7.091	0.779	
決定係数	Cox-Snell		Nagelkerke	
	0.580		0.784	
回帰式の有意性	<0.001			
判別率	87.5%			

2. 走行危険感に関しても、有意な差がない

3. 車両との距離感を保つタスクに関しては、自転車は実走では距離感を過大評価するが、シミュレーション環境下では過小評価をする傾向があることが分かった

これらのことから、夜間のシミュレーション走行に関する車両挙動に関しては、概ね実走と同程度の安全性指標の値を算出可能であると考えられる。その一方で、人間の距離感覚等までは再現しきれない可能性が示唆される。

参考文献

- 1) Rachael A Wynne, Vanessa Beanland, Paul M. Salmon: Systematic review of driving simulator validation studies, Safety Sciences 17, 2019, pp. 138-151
- 2) 溝口諒, 山中英生: 広視野型自転車シミュレータの実環境再現性に関する分析, 土木学会論文集 D 3 (土木計画学), vol. 71, No. 5, (土木計画学研究・論文集第 32 巻), I_737I_742, 2015
- 3) 櫻井淳, MORALES ARENAS ANGEL, 三宅智也, 松本修一: シケインにおけるサイクリングシミュレータの走行再現性, 第 63 回土木計画学発表会, CD-ROM, 2021
- 4) Steve O'Hern, Jennie Oxley, Mark Stevenson: "Validation of a bicycle simulator for road safety research", Accident Analysis and Prevention vol. 100, 2017, pp. 53-58
- 5) Jordanka, Kovaceva, Gustav Nero, Jonas B ärgman, Marco Dozza: "Drivers overtaking cyclists in the real-world: Evidence from a naturalistic driving study", Safety Science 199, 2019, pp. 199-206
- 6) Marco Dozza, Ron Schindler, Giulio Bianchi-Piccinini, Johan Karlsson: "How do drivers overtake cyclists?", Accident Analysis and Prevention vol. 88, 2016, pp. 29-36
- 7) Alex A. Black, Rebecca Duff, Madeline Hutchinson, Ingrid Ng, Kirby Phillips, Katelyn Rose, Abby Ussher, Joanne M. Wood, Effects of night-time bicycling visibility aids on vehicle passing distance, Accident Analysis and Prevention, Vol. 144, pp. 1056-1063, 2020.
- 8) 知花弘吉, 夜間の直線空間における歩行者による自転車の視認性, 日本建築学会計画系論文集, Vol. 572, pp. 61-66, 2003.
- 9) 浅田拓海, 谷下雅義, 夜間の路面照度が自転車走行挙動に与える影響—生活道路を対象とした基礎的実験—, 土木学会論文集, Vol. 72, No. 5, I_585-I_593, 2016.
- 10) Joanne M. Wood, Richard A. Tyrrell b, Ralph Marszaleka, Philippe Lacherez a, Trent Carberry, Bicyclists overestimate their own night-time conspicuity and underestimate the benefits of retroreflective markers on the moveable joints, Accident Analysis & Prevention, Vol. 55, pp. 48-53, 2013.
- 11) Joanne M. Wood, RA Tyrrell, R Marszalek, P Lacherez, T Carberry, BS Chu, MJ King, Cyclist visibility at night: Perceptions of visibility do not necessarily match reality, Journal of the Australasian College of Road Safety, 2010.

4.3 シミュレータ環境のオープン化と仮想実験コースの作成

(1) システムの概要

提案した交通安全対策案（プロテクテッド型交差点）の評価を行えるように、CCSの改修を行う。

実験コースに段階的に交通安全対策メニューを導入できるように、仮想道路空間を構築する。なお、この仮想道路空間は、オープンデータとしても活用できるように、UNITY 上に交差点や単路、トンネル区間を含む実験コースを作成する。

様々な仮想道路環境を整備するため、拡張性の高いゲームエンジンと、オープンデータを活用したドライビングシミュレータの開発を行った。今回は、自動車と自転車の同時操作が可能な協調型ドライビングシミュレータとして開発を行うこととした。

(2) 開発環境

a) ゲームエンジン

ドライビングシミュレータの開発環境として、ゲームエンジン Unity を採用した。Unity は、クロスプラットフォームに対応したコンピュータゲームの統合開発環境である。開発言語として、C# による開発が可能であるとともに、様々な Asset パッケージの利用が可能である。また、様々な形式の 3次元モデルをインポート可能であり、グラフィックエンジンによるリアルタイムレンダリングが可能である。

b) モデリング

仮想実験コースのモデリング環境として、3DCG ソフトウェア Houdini を採用した。Houdini は、プロシージャルモデリングが可能である。プロシージャルモデリングは、プログラミングによる 3次元モデルの生成が可能であり、手作業によるモデリングと比較して、作業効率が高い。また、プログラムやパラメータに変更を加えることによって、モデルの拡張やモデルの形状が変更可能となる。

c) オープンデータ

仮想外部環境のモデリングには、オープンデータ PLATEAU を活用した。PLATEAU は、国土交通省が取りまとめている日本全国の 3次元都市モデルのオープンデータ化プロジェクトである。今回は、テストコースにおける背景建物のモデルとして使用した。

(3) システムの構成と開発

本システムは、自動車と自転車の協調型ドライビングシミュレータとして開発を行った。一台の PC に、ハンドルコントローラを用いた自動車の操作と、サイクリングシミュレータを用いた自転車の操作の二系統で情報を入力する。入力された情報をもとに仮想都市空間内でそれぞれの車両を移動させるとともに、それぞれの車両の運転者からの視点を、個別のモニター（ディスプレイや HMD）に出力するものと

した(図-4.32)。

自動車モデルは、UnityのAssetをカスタマイズして、移動制御を行った。駆動方式は前輪駆動、後輪駆動、四輪駆動を設定可能であり、アクセルやブレーキ操作時のタイヤの回転数や車重による加減速や、路面状況に対するサスペンションの値等を再現可能である。また、ハンドルの回転角に対する車両制御について、ハンドルコントローラの精度をもとに調節を行うことができる。また、運転手からの視点として、車内に仮想カメラを設置した。さらに、サイドミラーとバックミラーの位置にも仮想カメラを配置し、これらのカメラから見える視点を、ミラー面にリアルタイムで反映させるマテリアルを設定し、これらを再現した。HMDと連動することで、回頭行動により車内からの道路状況の確認行動を再現することが可能となる(図-4.33)。

自転車モデルは、車両モデルとしてUnity Assetを利用した。サイクリングシミュレータと連携し、ハンドルによる操作とともに、ペダルを漕ぐことで加速し、ブレーキにより減速することとした。また、運転者の視点に仮想カメラを設置した。それぞれの車両による運転者からの視点画面をデュアルディスプレイとして出力し、同一のPC上での協調型シミュレータとして開発を行った。各車両の走行位置について、ログデータを取得するものとした(図-4.34)。

(4) 仮想道路モデル

実験用道路モデリングを、Houdiniによる手続き型モデリングで行った。基盤となるモデルを作成し、道路のパスを用意することで、歩道、車道、各種自転車専用道やガードレール・縁石等を自動生成した。これらは、パラメータを変更することによって、道路幅員や自転車道の種類等を変更可能なものである(図-4.35)。

テストコースとして、各種自転車専用道モデルを作成した。また、交差点、合流、トンネルなどの作成を行った。交差点モデルでは、自動車用と歩行者用の信号機モデルを設置し、一定時間で切り替わるものを用意した(図-4.36)。また、歩行者モデルと他車両モデルとして、あらかじめ設定したスプラインに沿って移動するNPCモデルを用意した。

背景となる建物モデルとして、PLATEAUのオープンデータを使用した。今回はLOD2モデルを流用し、簡易軽量ではあるがテクスチャのある建物モデルを道路に沿って配置した。今後、LOD3モデルやフォトグラメトリなどによる測量データの活用を検討している(図-4.37)。

(5) まとめ

ゲームエンジンとオープンデータを用い、低コストで一定程度の再現性を有した、協調型ドライブシミュレータの開発を行った。今後、シミュレーション実験を行い、実環境での実験結果と比較するとともに課題抽出を行っていく。今後の実装計画として、信号機の制御や自転車専用信号の追加を行っていく。

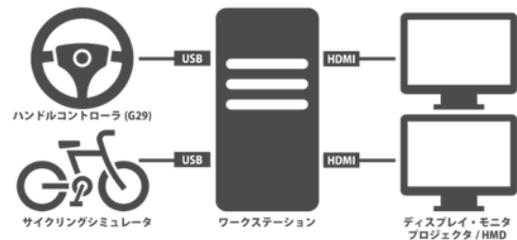


図-4.32 システム概要図



図-4.33 自動車モデル(左：車両外観、右：車内からの視点)



図-4.34 自転車モデル(左：車両外観、右：CS設定画面)



図-4.35 仮想道路モデル(左：交差点、右：自転車専用道路と車道)



図-4.36 仮想道路モデル(左：トンネル、右：信号機)

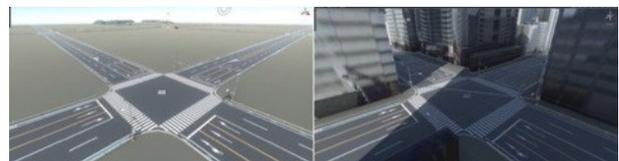


図-4.37 仮想道路モデル(左：テストコース、右：テストコースにPLATEAUを追加)

また、信号や交通流に基づくNPCによる自動車や自転車などの他車両と歩行者の再現を行う。さらに、昼夜間などの時間変化、天候条件の設定を行う。背景となる外部環境モデルとして、フォトグラメトリ等の活用によるモデル開発を行い、高品質なモデル作成の汎用化を進めていく。

4.4 自転車用信号に関する実験

(1) 実験の背景と目的

国土交通省によると、交通安全対策として、1.道路改良、2.交通安全施設の設置、3.ビッグデータの活用の3点を挙げている。交差点内での交通安全施設として、信号機がある。自転車専用信号機に関しては、交差点の幾何条件や運用上の条件において、安全性などの理由から自転車通行を時間的に制御する必要がある場合に設置されるもので、近年は米国において様々な用途の自転車専用信号が導入されているが、その設置効果に関する研究は限られているのが現状である。

信号の設置位置に関する研究では、松田ら⁴⁾は、複数の交差点において車両用信号の位置の違いに関して、ドライビングシミュレータ（以下“DS”と記す）実験で比較を行った。その結果、車両信号機が交差点の左手前の停止線直近（以下“nearタイプ”と記す）では、交差点左奥（以下“farタイプ”と記す）と比べて、黄色切り替えタイミングにおいて通過判断を取りやすいことを示した。次に小松ら⁶⁾は、複雑な幾何構造の交差点における信号機位置の違いに対する車両挙動の分析を行った。その結果、nearタイプの方が青から黄への信号切り替え時に通過判断を下しやすく、停止する車両については停止線を遵守する割合が高いことを示した。これは、nearタイプの方がドライバーにとって通過・停止の判断がしやすいことを示唆していると指摘している。大木ら⁷⁾は、信号機位置の違いが交差点内における自動車の右折挙動に与える影響をDS実験により分析を行った。その結果、信号機の設置位置は右折時の運転挙動に大きな影響を及ぼさないことを指摘している。このように、車両用信号の設置位置に関しては、研究の蓄積がなされている。自転車専用信号に関しては、交差点の観測調査から自転車に必要なクリアランス時間等を加味した信号制御案を提案した事例⁸⁾や自転車専用信号をテストコースに設置して、自転車の挙動等を観測した事例⁹⁾はあるものの国内の知見は少なく、海外では自転車専用信号と道路構造の違い等、自転車走行空間の安全性確保の視点での事例が報告されている⁹⁾。

このように、自転車専用信号に関する研究は限られているが、今後、自転車通行環境の整備により、速度の高い自転車等の交差点流入の増加が想定されることから、より高度な信号制御方法を検討する必要がある。

そこで本研究では、自転車専用信号の設置位置に焦点をあて、交差点近傍で黄色信号に切り替えるシナリオ、自転車の停止挙動の自転車シミュレータ（以下“CS”と記す）実験を行う。交差点における黄色信号切り替え時の自転車挙動を評価することで、自転車に対する車両用信号と自転車専用信号のより良い設置位置の検討に役立てることを目的とする。なお、本研究における自転車専用信号は、縦型に設置した車両用灯器に「自転車専用」と表示した標示板を附

置したものであり、自転車専用信号の信号現示は、同方向に進行する自動車用現示と同時に青表示が開始され、自動車用現示よりも先に黄及び赤表示が開始されるものとして設定した。

本実験では、自転車専用灯器信号の位置が自転車の停止行動に影響を信号交差点において、自転車にジレンマゾーンが存在すると仮定し、自転車がジレンマゾーンにおいて信号が青から赤に切替わる状況下において、後述する3つの異なる信号設置位置での比較実験を行った。

本研究で使用するスクリーン型CSは、100インチ（高さ155cm、幅220cm）のスクリーン3面、主計算機1台、超単焦点プロジェクタ3台から構成される。また、プロジェクタからVRヘッドセット（Oculus Rift S）への出力の切り替えが可能のため、これをHMD型CSとして使用した。ソフトウェアは、交通環境を想定した道路や走行シナリオが柔軟に作成可能なフォーラムエイト社製のUC-win/Road version14.2を使用した。なお、本シミュレータは、走行軌跡の座標値、速度、走行距離などのログを出力可能なため、このデータを解析・分析に用いた。

(2) 実験概要

HMDを使用している実験走行では、自転車専用信号・自動車専用信号の信号機位置を変えた3つのシナリオで比較を行った（シナリオA：図-4.38）。

シナリオA：自転車専用信号・自動車専用信号が交差点の奥にあるパターン（図-4.39）

シナリオB：自転車専用信号が手前、自動車専用信号が奥にあるパターン

シナリオC：自転車専用信号・自動車専用信号が交差点の手前にあるパターン

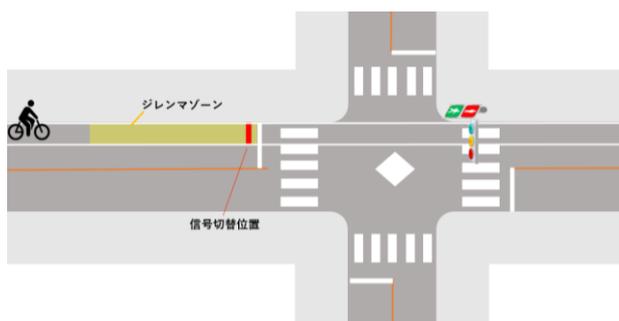


図-4.38 シナリオA（信号位置の概要）



図-4.39 シナリオA（シナリオ走行時の風景）

(3) 交差点形状

交差点の形状については、交通工学研究会が出版している「自転車通行を考慮した交差点設計の手引き」や「平面交差の計画と設計基礎編」のマニュアルやガイドラインを用いて作成した。信号灯器の高さは2.5m以上の高さを確保する等、道路交通法の規定については交通管理者に監修して頂いた。

(4) ジレンマゾーンの設定

信号の設定においてはジレンマゾーンの計算を行い、データ取りを行った。ジレンマゾーンの計算式は下記である。

$$L_1 = \tau V + \frac{V^2}{2d} \quad (1) \text{ 減速して停止するまでの走行距離}$$

$$L_2 = YV \quad (2) \text{ 黄時間の走行距離}$$

L_i : 黄信号開始時の停止線までの距離
 τ : 反応時間 1 [s]
 V : 車両速度
 d : 減速度 0.3 [g] (g=重力加速度 9.8 [m/s²])
 Y : 黄時間 3 [s]

黄色信号の間に運転者が通常の減速度では、交差点を通り抜けることも停止線で停止することもできない領域である。本実験では、車道にジレンマゾーンを設置し、信号切替り時の位置を停止線から9.9mとした。

(5) 信号現示時間

今回の研究では渋谷の警察署前の交差点の信号現示の切替りタイミングを参考に作成した。信号の現示時間は図-4.40の通りである。渋谷交差点の場合、自動車の左折と直進の矢印であるが、実験のため青の灯火で代用した。また、現示1, 5の現示時間は、今回の実験に関係はない。

(6) 被験者と走行条件

本実験での被験者を表-4.8にまとめた。本実験では、各被験者がひとつのシナリオにつき、10回走行してもらい、各走行の2, 5, 9回目に信号が切り替わるよう設定した。各被験者3種類のシナリオで走行してもらうため、1人30走行してもらう。走行順序が偏ってしまうとその影響で結果にバイアスが出てしまうため、信号切替えの走行が発生する順番は偏りがないようランダムに割り振った。

(7) 練習走行

HMDによる実験走行では、シミュレータでの停止や速度感等の操作に慣れてもらうことを目的として、練習走行を楕円形の道路を用いて行った。

(8) 本実験走行

実験走行ではHMDを使用し、各シナリオにつき10回走行してもらった。12km程度で走行するように被験者に教示し、被験者が負担になりすぎない範囲で

信号	階梯	1	2	3	4	5
自転車		→	→	→	→	→
自動車				→	→	→
各現示時間			3	3	4	
累積時間						

図-4.40 信号切り替わり時間の設定

表-4.8 被験者一覧

ID	年齢	性別	自転車利用頻度
1	22	女	めったに利用しない
2	22	女	めったに利用しない
3	21	男	めったに利用しない
4	21	男	めったに利用しない
5	20	男	週1, 2回
6	21	男	週1, 2回
7	22	男	めったに利用しない
8	22	男	めったに利用しない
9	22	女	週1, 2回
10	20	男	週3, 4回
11	22	女	めったに利用しない
12	22	男	週1, 2回
13	20	男	週1, 2回



図-4.41 教示（本番走行）

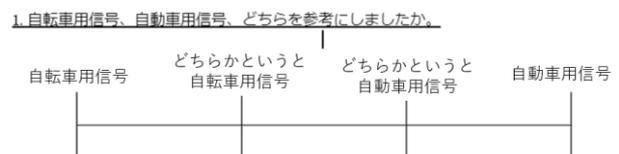


図-4.42 アンケート調査の抜粋

速度統制を行った。

また、あらかじめ自転車専用信号と自動車専用信号の区別をつけられるように事前に図-4.41のような資料を提示し説明を行った。また、評価指標は、停止線通過確率・停止線通過距離・停止線までの距離・停止線通過速度・ジレンマ通過速度の5項目である。また、アンケート調査では自動車専用信号・自転車専用信号どちらを参考にしたのかという4件法(図-4.42)や、自転車の利用頻度等をヒアリングした。

(9) 実験結果

a) 停止線通過率

実験結果に関して、停止線通過率を見てみると、自動車専用信号、自転車専用信号が共に奥に設置されている場合（シナリオA）、交差点進入確率が極端に高いことが分かった（図-4.43）。その一方、信号灯器が手前にある場合（シナリオB、C）、停止線を越えてから信号を自分で目視し確認することは出来ない。そのため、信号を確認できる位置で停止していると考えられる。

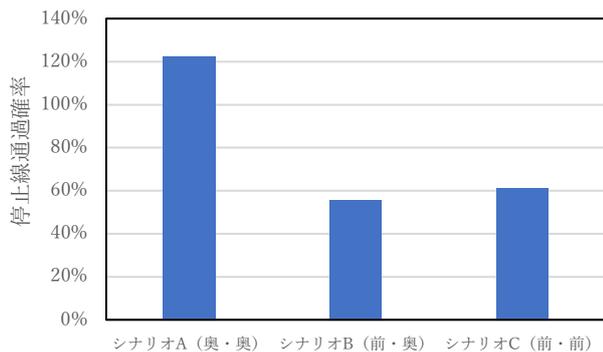


図-4.43 停止線通過確率

b) 停止線通過距離

停止線通過距離に関しては、統計的に有意な差はないがシナリオBの方が、他シナリオ2つより通過距離が短い傾向にある($F(2,32)=0.61, p=0.54$)（図-4.44）。また、停止線までの停止距離を見ると、統計的に有意な差はないが、中央値をみるとシナリオCが他シナリオ2つより値が大きくなる可能性が見て取れる($F(2,73)=1.85, p=0.16$)。

c) 停止線までの距離

最後に、信号切替わり時に停止した走行の自転車の停止時の位置から停止線までの距離を図-4.45に示す。この結果、パターンCが最も停止線からの距離が長いことが見て取れる。これは、信号灯器を交差点手前に設置することで停止線までの間に余裕が持て、走行している人の安全が確保できやすい可能性が見込まれることを示唆している。

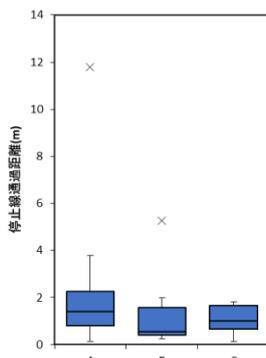


図-4.44 停止線通過距離

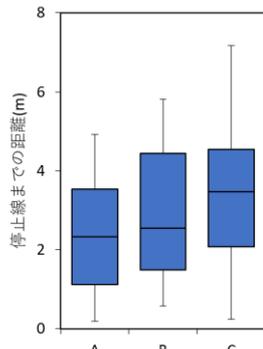


図-4.45 停止線までの距離

(10) まとめ

本研究では、以下のような知見が得られた。1. 車両用信号の位置に関わらず、自転車専用信号が交差点手前にあることが、自転車の無理な交差点進入を抑制する効果がある。2. 自転車用信号を交差点手前に設置することで、被験者は自転車専用信号を参考にしやすい傾向にある。

参考文献

- 1) 警察庁交通局：令和2年における交通事故の発生状況等について、<https://www.npa.go.jp/publications/statistics/koutsuu/jiko/R02bunseki.pdf>, 2021.(2023年4月6日アクセス)
- 2) 内閣府：特集「道路交通安全政策の新展開」—第11次交通安全基本計画による対策—,https://www8.cao.go.jp/koutu/taisaku/r03kou_haku/zenbun/genkyo/feature/feature_02_3.html, 2020. (2023年4月6日アクセス)
- 3) 国土交通省：交通安全の取り組み,<https://www.mlit.go.jp/road/road/traffic/sesaku/torikumi.html>, (2023年4月6日アクセス)
- 4) 松田啓輔, 柳原正実, 小根山裕之：灯器位置が異なる交差点の混在に着目した信号切替り時の運転挙動に関する研究, 土木学会論文集D3, Vol. 74, No. 5, pp. I_1315-I_1325, 2018.
- 5) Monsere, C, Hurwitz, D., Fink, C., Kothuri, S., Schultheiss, B., Hillman, T., Shaw, G., Boudart, J., Cobb, D. Road User Understanding of Bicycle Signal Faces on Traffic Signals. NCHRP Web-Only Document 273. 2020.
- 6) 小松香貴, 柳原正実, 小根山裕之：複雑な交差点における異なる信号灯器位置に対する車両挙動分析, 交通工学論文集, Vol. 8, No. 4, pp. A_61-A_69, 2022.
- 7) 大木裕貴, 柳原正実, 小根山裕之：信号灯器の設置位置が右折挙動に及ぼす影響に関する研究, 交通工学論文集, Vol. 7, No. 2, pp. A_298-A_306, 2021.
- 8) 福山大地, 田中伸治, 中村文彦, 有吉亮, 三浦詩乃：自転車を考慮した信号制御の指針作成に向けた観測調査に基づく自転車のクリアランス時間の分析, 交通工学論文集, Vol. 5, No. 2, pp. A_161-A_166, 2019.
- 9) Abdul Rahman ABDUL RAHIMI, Aya KOJIMA, Hisashi KUBOTA, "Experimental Research on Bicycle Safety Measures at Signalized Intersections" Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.10, pp.1426-1445,2013.
- 10) Logan Scott-Deeter, David Hurwitz, Brenda Russo, Edward Smaglik, Sirisha Kothuri, "Assessing the impact of three intersection treatments on bicyclist safety using a bicycling simulator", Accident Analysis and Prevention, Vol.179, 2023.

第5章 協調型サイクルシミュレータシステムによる交通コンフリクト実験

5.1 はじめに

2017年施行の自転車活用推進法のもと、2018年には国の自転車活用推進計画¹⁾が策定され、都道府県や各自治体において地方版の自転車活用推進計画が策定²⁾されており、環境、健康、観光での自転車活用と自転車通行環境整備が進められている。このように自転車の利用促進に着目が高まっているが、自転車関連事故は全事故の2割と高い割合を占め、人口当たりの死者数は先進国と比較しても多く、安全とは言えない状況にある。

日本では、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」³⁾以後、自転車の車道通行を前提とした自転車通行環境整備を進めており、交通工学研究会では、「自転車の車道走行を基本とした交差点の設計の手引き」⁴⁾を刊行している。この結果、自転車関連の交通事故件数は10年で約半分に減少したものの、全事故の減少率に比べると小さな減少傾向に留まっている。特に、自転車事故の約7割は交差点とその付近で発生し、信号交差点では自動車右左折時の事故が多くを占めており、車道走行自転車と自動車左折車の安全性確保が課題とされている。

このような背景を踏まえ、本研究では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、交差点形状、自転車通行空間による安全施策の効果を評価することを目的とした。

5.2 既往研究と本研究のアプローチ

自転車の車道走行を考慮した交差点安全性については、教習場構内実験⁵⁾や、マルチエージェント・シミュレーション⁶⁾を用いた研究などが進められてきた。

小川ら⁷⁾は、左折自動車と直進自転車の錯綜安全性を向上する交差点整備方式を提案し、マルチエージェント・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前で交差させる「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⁷⁾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について、ドライビングシミュレータを用いた自動車・自転車それぞれを被験者とする実験を行い、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⁸⁾は、協調型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で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からみて、両側通行の危険性、車道左側通行の安全性を明らかにしている。

以上の研究では、交通ルールに従った交通挙動についての安全性評価を示しているが、実際の交差点では、ルール外の自転車の挙動が発生することや、交差点形状によって自動車速度やドライバーからの視認性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。

このため、本研究グループでは、実交差点でのビデオ観測分析⁹⁾ およびタクシー搭載のドライブ・レコーダの分析¹⁰⁾ をもとに、左折自動車と錯綜現象を引き起こす自転車の走行パターンを抽出して、協調型シミュレータを用いた分析を行ってきた。

2020年の研究¹¹⁾ では、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、協調型シミュレータ実験により自転車挙動の危険性および被験者の不安感を分析した。

さらに2021年研究¹²⁾ では、「死角並走」、「廻り込

み横断」,「逆走横断」のパターンを抽出し,協調型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ない比較評価している。

本研究では,これらの結果を踏まえ,第一通行帯の幅員,矢羽根表示,自転車専用通行帯,隅角部線形といったわが国で導入・検討されている交差点施策に加えて,自転車利用者の安全感と安全性を向上させるために海外で整備が進んでいる「プロテクト型」の交差点形状と,さらには,歩道幅員が十分でない場合のプロテクト型の導入例として提案されている交差点形状を対象に錯綜再現実験を行い,TTCおよび接近速度,接近方向,ドライバー不安感を用いて比較評価することを目的とした。本報告は,同目的の既報¹²⁾をもとに,実験条件と実験ケースを加えた結果を示すものである。

5.3 実験の概要

(1) 協調型シミュレータ

本研究では,衝突や危険な錯綜を含む実験を仮想空間上で実施可能な,協調型シミュレータを用いて再現実験を行った。図-5.1に実験に用いた協調型シミュレータ(以下CS)を示す。

CSは, FORUM8社製UC-win/Road改良版を使用している。自転車および自動車それぞれが運転者となり,同一の仮想空間上で移動体験ができる。自転車運転者には,自動車の接近時の走行音について5.1CHのサウンドが再生されている。約30フレーム/秒の走行ログ(位置,速度,進行角度)が記録され,そのデータから安全指標を算出している。また,左後方を走行する自転車を視認できるように,バックミラーに加えて,サイドミラー,左後方窓にも視野像を示す改造を加えている。

(2) 実験ケースの選定

a) 自転車走行パターンの選定

本研究では,ビデオ観測調査⁹⁾で明らかになった信号交差点における錯綜パターンとドライブ・レコーダの分析¹⁰⁾で明らかになった危険走行ケースに,既往研究の結果を踏まえて,図-5.2に示す死角並走,廻り込み走行の自転車走行パターンを対象に,安全性に影響すると考えられる交差点形状の効果を把握することとした。

さらには,海外で整備が進んでいる「プロテクト型」の交差点,さらには交通工学研究会発刊の交差点手引において提案されているプロテクト型交差点形状を対象に評価することとした。プロテクト型では,車道の交差点流入位置から離れたところを自転車が流入する形式をとる。このことから,一般的な広幅員の自歩道から直進して交差点に流入するケースと比較評価することとした。

NACTO型プロテクト交差点は,NATCOのマニュアル¹⁴⁾に示されている形式で,車道からセット

バックした位置に自転車道があり,車道と並行に直進で交差点に流入する。手引型プロテクト

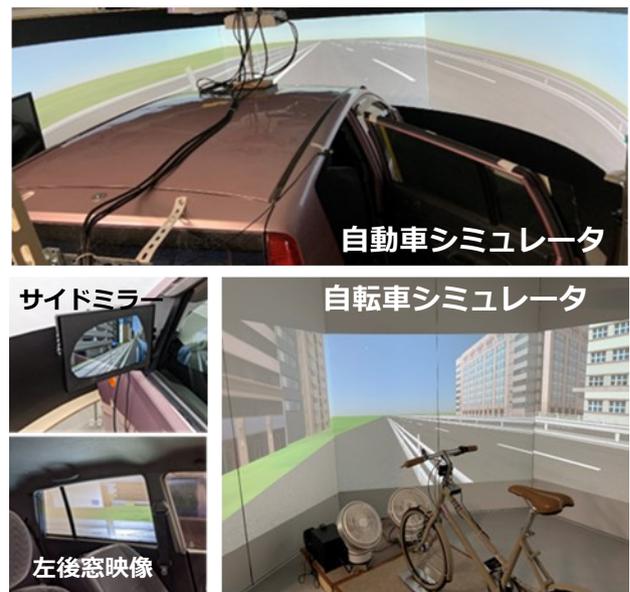


図-5.1 実験に用いた協調型シミュレータ

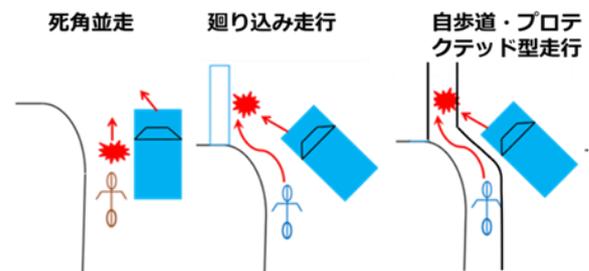


図-5.2 評価対象とした自転車走行パターン

表-5.1 比較対象交差点と自転車走行実験の組み合わせ

交差点形状	自転車通行空間		SB	隅角半径	実験	
	幅員	表示			パターン	年次
J1 標準形	3.25m	車線・矢羽根	3.0m	5.0m	廻り込み走行	●●
J2 J通行帯拡幅	4.25m	車線・矢羽根	3.0m	5.0m	死角並走	●●
J3 自転車通行帯	1.5m	自転車通行帯	3.0m	5.0m	廻り込み走行	●●
J4 セットバック拡大	3.25m	車線・矢羽根	5.0m	5.0m	死角並走	●●
J5 隅角部縮小	3.25m	車線・矢羽根	3.0m	3.0m	廻り込み走行	●●
J6 隅角部拡大	3.25m	車線・矢羽根	3.0m	10.0m	死角並走	●●
J1 標準形	6.0m	自歩道	3.0m	5.0m	自歩道走行	●●
P2 手引型SB小	1.5m	自転車道	3.0m	5.0m	自歩道走行	●●
P3 手引型SB大	1.5m	自転車道	5.0m	5.0m	自歩道走行	●●
P6 手引型隅角縮小	1.5m	自転車道	3.0m	3.0m	自歩道走行	●●
P4 NACTO型SB小	1.5m	自転車道	3.0m	3.0m	自転車走行	●●
P5 NACTO型SB大	1.5m	自転車道	5.0m	3.0m	自転車走行	●●
P7 NACTO型隅角拡大	1.5m	自転車道	3.0m	5.0m	自転車走行	●●

実験 ●: 2022年度実験 ●: 2023年度実験

交差点は,交通工学研究会の「自転車通行交差点手引き」⁴⁾で歩道幅員が十分でない場合の形式で,歩道内で自転車道をシフトしている。

b) 自転車走行空間及び交差点形状

実験対象とした交差点形状を図-5.3,表-5.1に示す。表中に示すように5種類ずつの比較実験を2か年にわたって実施している。

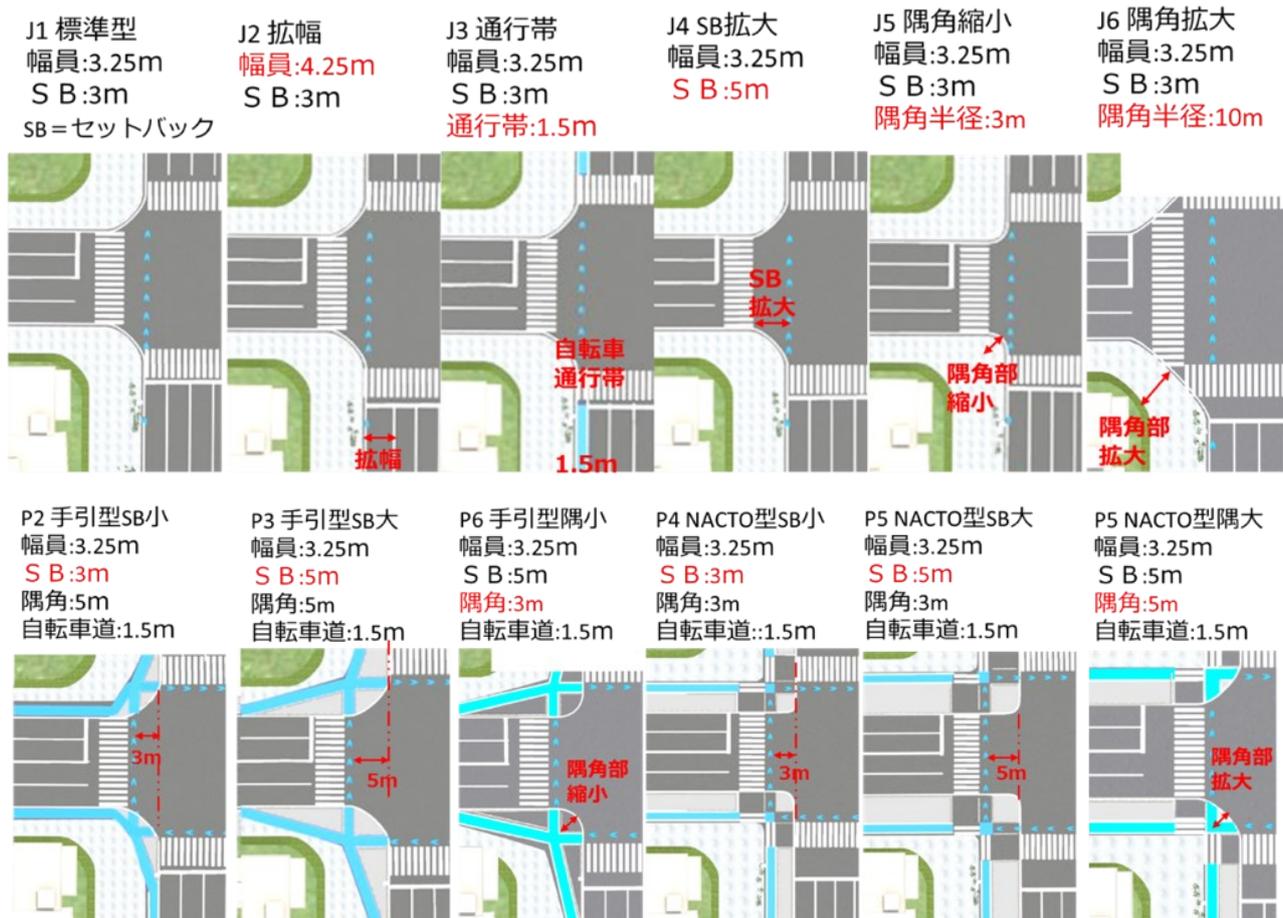


図-5.3 比較対象の交差点形状および安全施策

c) ドアミラー・左後方窓の安全確認設定

ビデオ観測分析、ドライブ・レコーダ分析で観測されたヒヤリハットでは、ドアミラーや左後方ウィンドに自転車が視認できるのに、それに気づかず左折を開始するケースが見られた。本実験では、ドアミラーの小型液晶ディスプレイ・左後方ウィンドにプロジェクターで視認映像を表示するとともに、この映像のON-OFFによって、後方の安全確認ができる状況と確認できない状況を実験ケースとして加えている。ただし、後方確認有無ケースは全ケースに同数ずつあるため、以下では合計の発生状況を用いて、交差点形状の危険性を評価している。

d) 実験ケースの設定

交差点形状と走行パターンを組み合わせた15ケースに、左後方確認映像の有無を組み合わせた30ケースを実験ケースとした。この実験セットについて、交差点形状を変えて2か年をかけて実施している。30ケースをランダム順に実施し、各ケース被験者1人について錯綜が生じたサンプルが2回以上取れるよう繰り返した。

(3) 実験シナリオ

a) 協調型実験

被験者が、自動車および自転車を操作して錯綜を再現した。自動車は、直線区間から前方車両に合わ

せた速度で交差点へ進入し、左折するように指示した。自転車は、自動車が特定の地点を通過した時、走行パターンに合わせた位置に一定速度で出現させ、指示した走行をさせた。

なお、死角並走、自歩道・プロテクテッド型の自転車走行については、直進走行を維持するため、あらかじめ走行経路をシミュレータに指定して、指定された経路上のみを走行できるようにしている。

b) 自動車運転者の二重課題法

自動車運転者については、自転車への意識が集中できない状況を再現するため、被験者に対して二重課題法を採用した。具体的には1~9の数字を映像内にランダムに表示し、直前の数字と加えた値を口述させている。

c) ダミー実験の挿入

すべての評価ケースは、自動車左後方から自転車が直進する実験であるため、自動車被験者に慣れと自転車出現の予想を与えやすくなる。この傾向を低減するため、自転車が自動車の前方から手前に横断歩道を通行してくるケースをダミー実験として挿入している。なお、このダミー実験は10回に1回程度の頻度で挿入した。

d) 実験被験者

被験者は、各年度大学生12名である。2022年度は、

男性8名、女性4名、年齢は平均21.9歳、標準偏差1.56歳、運転歴4～66か月、2023年度は、男性10名、女性2名、年齢は平均21.9歳、標準偏差1.75歳、運転歴3～52か月、いずれも視力は運転に問題ないレベルであった。また、人間生活工学研究センター(HQL)による運転スタイルチェックシート、運転負担感受性チェックシートを実施して、公表されている平均値と比較している。シミュレータ酔チェックについても実施している。

(4) 評価指標

安全評価には、TTC（衝突前余裕時間、Time To Collision）、接近速度、被験者の不安感を用いた。

a) 二次元TTC値

TTCは、自転車と自動車が仮に速度と進行方向を維持した場合における衝突までの時間であり、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。

本研究では、図-5.4に示すように、車両形状を考慮した二次元TTC値および接近距離、接近速度を用いた。自転車と自動車の占有空間として、自動車は車長と車幅により四角形、自転車は車輪部の車長とハンドル部の車幅によるひし形として、ある時点で進行方向および速度ベクトルが一定とし、0.01秒後ごとの占有位置を推測し、衝突有無（自転車の4端点が自動車の四角形内に入ることを判定）を確認して、10秒以内に衝突が想定される場合をTTC値とした。これを自動車と自転車軌跡で記録されている0.1秒ごとのログの全時点で推計し、最小値を実験ケースのTTC値としている。

本研究では、危険なTTCが生じやすいシミュレータの特性を加味して、0.5s未満のTTC値を危険TTCとしてその発生頻度に注目した。また0.01秒以下をニアミスとしている。

b) 接近速度・方向

また、各時点での自動車の四角形4辺と自転車4端点間の最小距離を“接近距離”として、この接近距離の変化率（次時点の接近距離との差を時間差で除した値）を接近速度とし、自転車が接近している自動車部分を接近方向とした。

c) 不安感

実験ごとに、自動車、自転車の不安感を0-3点の数値で回答させ、評価指標として用いた。

5.4 実験結果

(1) 交差点形状によるTTC危険性評価

a) 自転車死角並走

図-5.5にTTC区別発生状況を示す。図中の青字の数値は、TTCニアミス発生率、TTC0.5秒以下の発生率について、標準交差点での発生率との差異をカ



図-5.4 二次元TTC値、接近速度

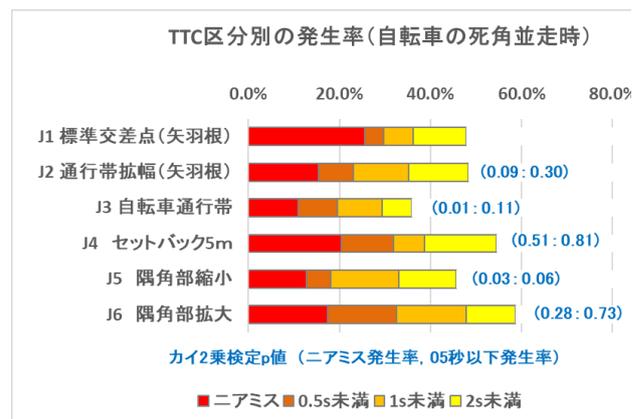


図-5.5 自転車死角並走時の危険TTC発生率

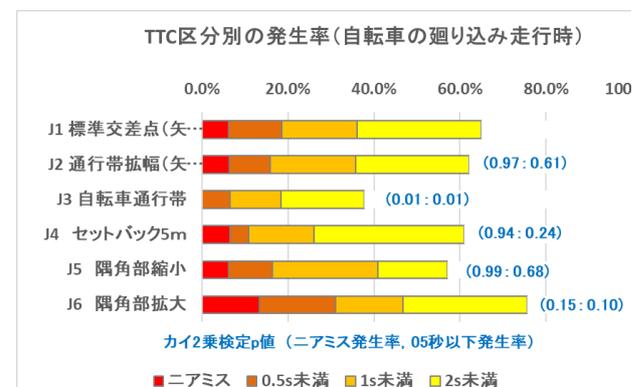


図-5.6 自転車廻り込み走行時の危険TTC発生率

イ二乗検定した結果を示している。この値が0.05以下であると、標準交差点と統計的に有意な差があると言える。

第一通行帯拡幅J2、自転車通行帯整備J3とも、J1より危険TTC発生率が低下しており、自転車通行帯のニアミス発生率も有意に低下している。セットバック拡大J4には有意差はないが、危険TTC発生率増加傾向が見られる。隅角部縮小J5は、危険TTC発生率が有意な減少を示し、一方、拡大J6は発生率の増加傾向が見られる。このように、隅角部縮小は、並走時に安全性向上効果があるといえる。

b) 自転車廻り込み走行

図-5.6に危険TTC発生状況を示す。第一通行帯拡

幅J2は、J1と比較して改善効果は見られない。対して、自転車通行帯J3は、危険TTC発生率が有意に減少している。通行帯整備は、廻り込み走行にも安全性向上の効果があると言える。これは、自動車の軌跡が交差点内側にシフトすることで、ドライバーが自転車を視認しやすくなるためと考えられる。セットバック拡大J4も自動車が自転車に正対しやすくなるため、有意ではないが改善傾向が見られる。一方で、隅角部縮小は、廻り込み走行には安全性向上がみられない。ただし、隅角部を拡大したJ6では、自動車が隅角部に近づくため危険性が高まっている。

c) プロテクト型走行

図-5.7に危険TTC発生状況を示す。歩道部で自転車道シフトする手引き型では、J1自歩道走行と比較して、セットバック5mのP3で危険TTC発生率の有意な減少を示している。隅角部縮小の手引き型P6では、ニアミス発生率は変化ないが、危険TTC発生率は減少している。一方で、セットバック位置を直進するNACTO型では、隅角部小で危険TTC発生率は低下している。また、手引型と異なり、セットバック小P4では、危険TTC発生率が低下している。これは自転車速度や自動車速度が高くなる影響が考えられる。隅角部拡大P7は、悪化傾向が見られるが、自動車速度上昇の影響と思われる。

(2) TTC・接近速度からみた危険性評価

a) 自転車死角並走

図-5.8に自転車死角並走時のTTC・接近速度の分布と衝突方向を示す。通行帯幅(J2)はJ1と比べて接近速度が低い値が見られるほか、自転車通行帯(J3)では危険性の低い車側面への錯綜が増加しており、どちらの形状も安全性向上が見られる。隅角部縮小

J5は危険性の低い車側面での錯綜が増加し、接近速度も低下し、危険性の改善が見られる。隅角部拡大J6では接近速度は顕著には上昇していない。

b) 自転車廻り込み走行

図-5.9にTTC・接近速度・衝突方向を示す。死角並走の錯綜時の接近速度よりも廻り込み錯綜時では接近速度が上昇する傾向が見られる。自転車通行帯整備J3は危険TTCの発生は減少が見られるが、接近速度に明確な傾向は見られない。セットバック拡大、隅角部変化については、衝突方向の変化は見られないが、接近速度は隅角部拡大のJ6で高い傾向が見られる。

c) プロテクト型走行

図-5.10にTTC・接近速度・衝突方向を示す。手引き型の接近速度・衝突方向に顕著な変化は見られない。NACTO型も手引き型と同様の結果が観測されている。この形式の特徴として、接近速度が平均的に高く、接近速度が高いケースで危険TTC値が観測されている。

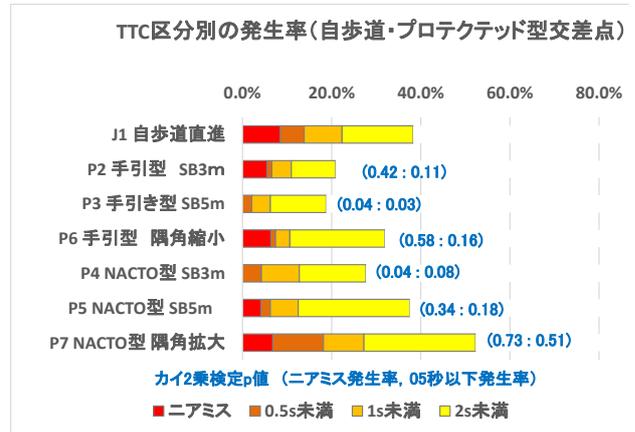


図-5.7 プロテクト型交差点の危険TTC発生率

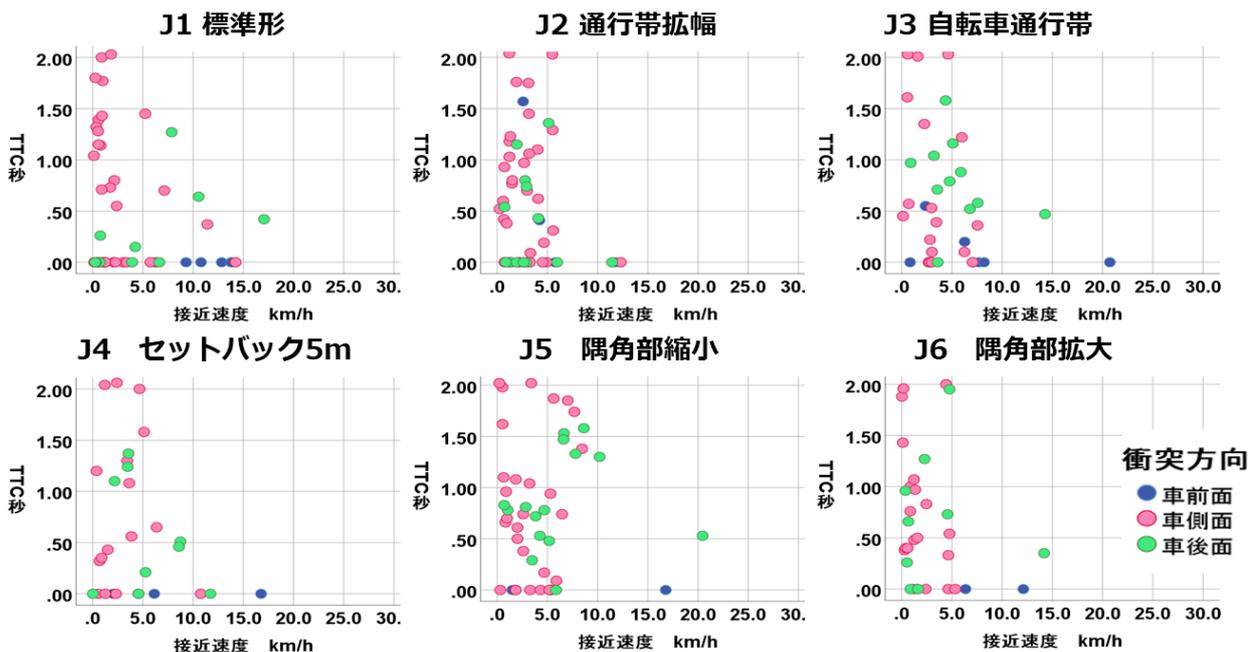


図-5.8 死角並走時のTTC・接近速度・衝突方向の発生分布

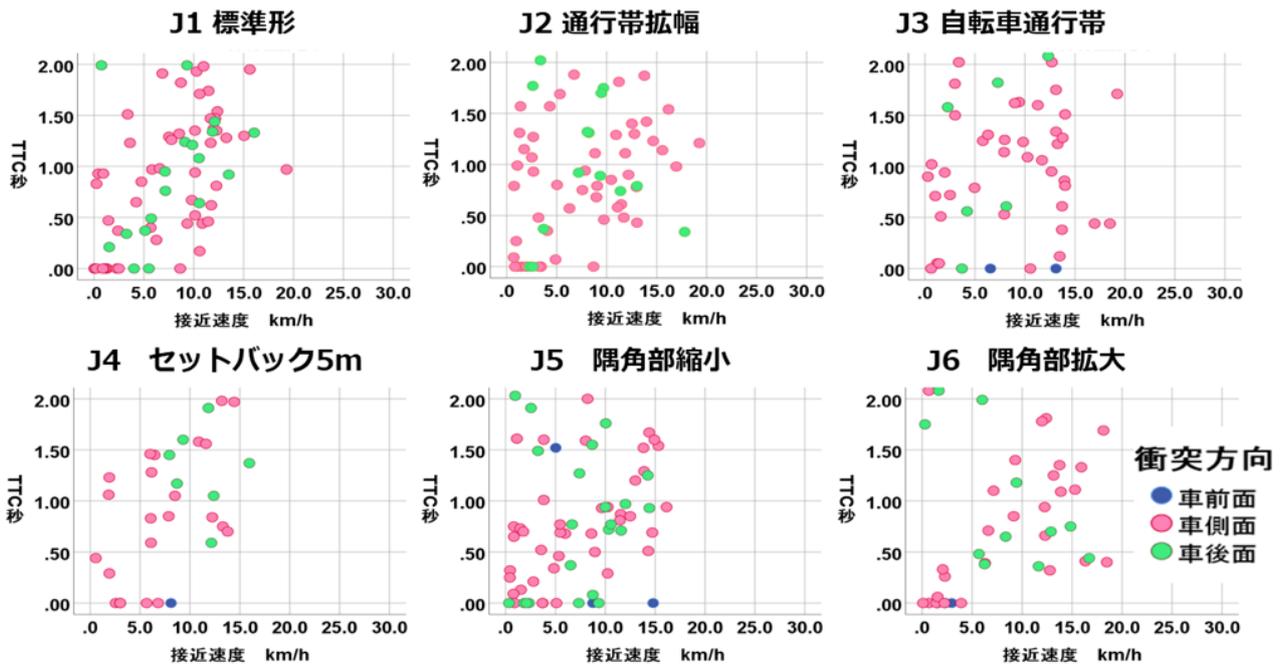


図-5.9 自転車廻り込み走行のTTC・接近速度・接近方向の発生分布

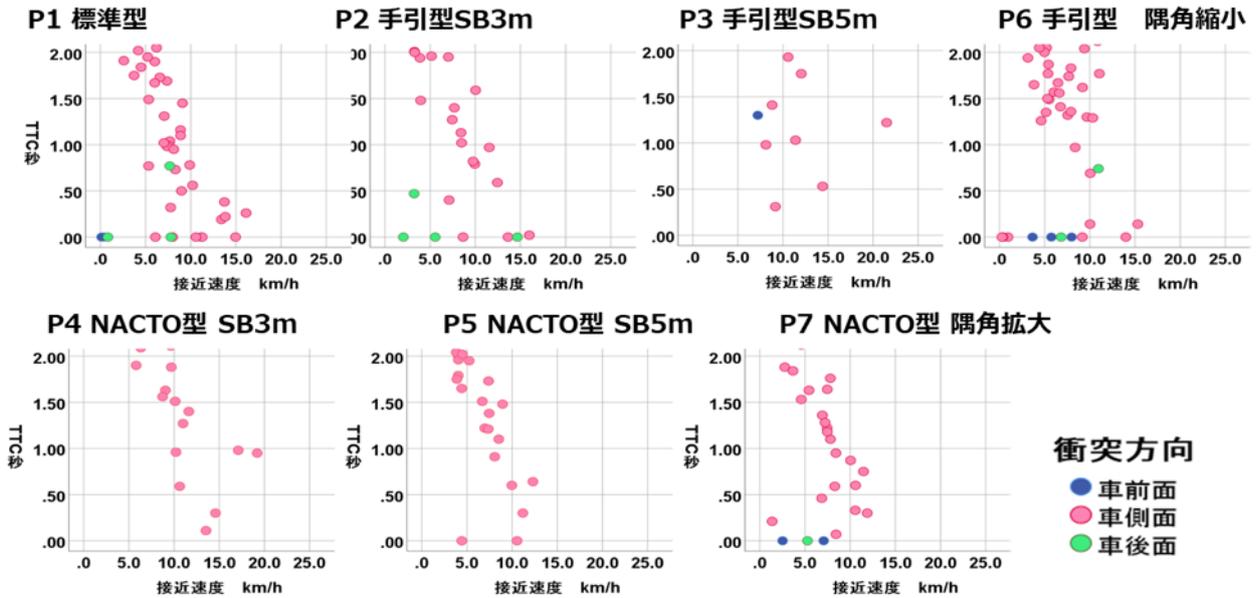


図-5.10 プロテクト型のTTC・接近速度・衝突方向の発生分布

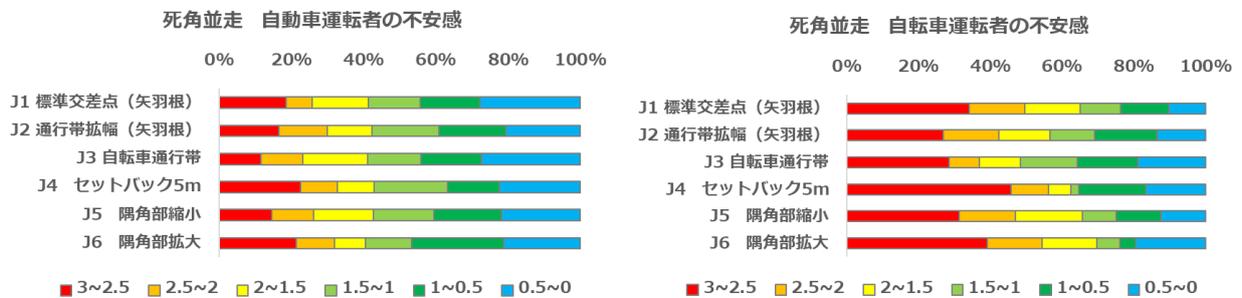


図-5.11 自転車死角並走時の不安感分布

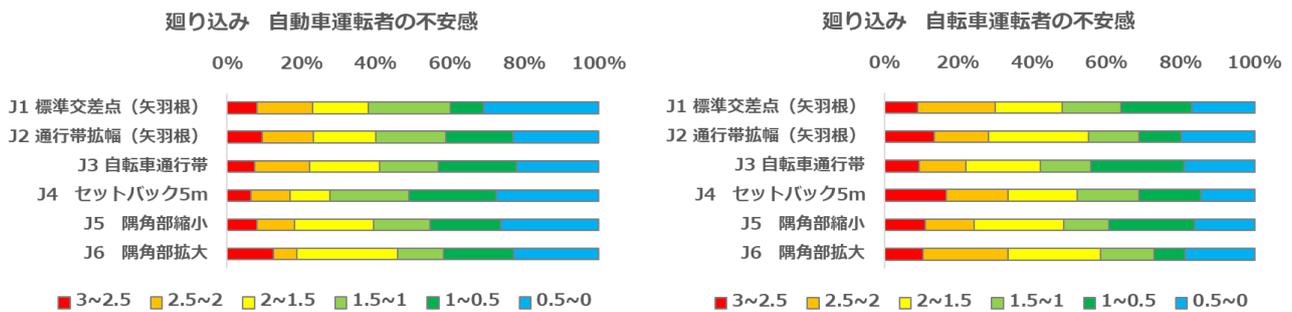


図-5.12 自転車廻り込み走行時の不安感分布

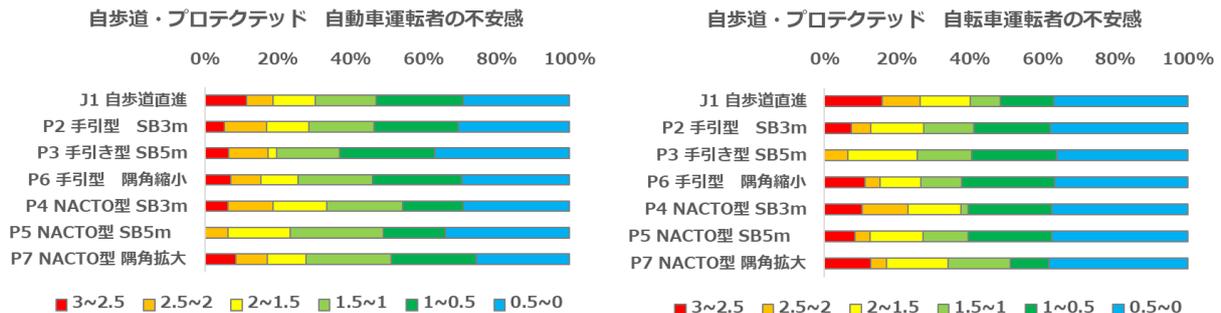


図-5.13 プロテクテッド型の不安感分布

(3) 自動車運転者・自転車運転者の不安感

a) 自転車死角並走

図-5.11に不安感の集計結果を示す。自動車では、危険を感じる2.5~3の回答割合が、危険TTCの発生率と類似している。セットバック拡大J4、隅角部拡大J6は標準形よりも不安感が高くなっている。自転車の不安感についても、危険TTC発生率と同様な傾向で観測されているが、自動車の不安感よりも高くなっている。

b) 自転車廻り込み走行

図-5.12に不安感の集計結果を示す。自動車の不安感に注目すると、危険TTCの発生率と同様の結果が見られるが、自転車通行帯J3は、危険TTC発生率で改善が見られたが、高い不安感が多い。車の前に廻り込んで横断される場合は、不安感が高いことがわかる。自転車の不安感についても自動車と同様の結果が得られたが、セットバック拡大J4で不安感が悪化しており、大きな廻り込み行動は自転車の不安を高めると言える。この走行パターンも自転車不安感が自動車よりも高い傾向にある。

c) プロテクテッド型走行

図-5.13に不安感の集計結果を示す。自動車の不安感では、危険TTC発生率の低かった手引き型セットバック大P3でも高い不安感が多い。一方で、危険TTC発生率が低下しなかった隅角部縮小P6で高い不安感が少ない。

P3では、自動車の左折終了後の再加速時に錯綜が発生すること、P6では左折に時間がかかることで自転車を視認しやすいことが想定される。NACTO型の

表-5.2 評価結果のまとめ

交差点形状	自転車走行	標準形J1との比較				
		危険TTC	接近速度	衝突方向	自動車不安感	自転車不安感
J2 通行帯幅	死角並走	○	◎			◎
	廻り込み走行		×	○		
J3 自転車通行帯	死角並走	◎		○	◎	◎
	廻り込み走行	◎	×	○		○
J4 セットバック拡大	死角並走	×			×	×
	廻り込み走行	○				×
J5 隅角部縮小	死角並走	◎	○	○	◎	◎
	廻り込み走行					
J6 隅角部拡大	死角並走	×	◎			
	廻り込み走行	×	×			
P2 手引型SB小	自転車道	○			◎	◎
P3 手引型SB大	自転車道	◎			◎	◎◎
P6 手引型隅角縮小	自転車道	○			◎◎	◎
P4 NACTO型SB小	自転車道	◎			◎	◎
	自転車道	◎			◎	◎
P5 NACTO型SB大	自転車道	○			◎	◎
	自転車道				○	◎
P7 NACTO型隅角拡大	自転車道					
	自転車道				○	◎

<凡例> ◎◎: 明らかな改善効果が見られる, ◎: 改善効果が見られる, ○: 改善効果が示唆されるが明確ではない, ×: 改悪効果が見られる, —: 改善・改悪の変化は不明

形状については、危険TTC発生率と同様の結果を示していた。自転車の不安感でも、他の走行パターンと同様に危険TTC発生率の割合に沿った結果観測となっている。ただし、自転車の不安感が自動車より高い傾向は見られない。これは、他の走行パターンと異なり、自転車の通行空間が自動車と明確に区別されており、自転車と自動車の間隔が十分に確保されているためと考えられる。

5.5 おわりに

表-5.2に実験で得られた評価結果を整理している。

自転車の車道通行時の対策に関しては、自転車通行空間を拡張したJ2, J3の両形態ともに、廻り込み走行時の接近速度は増加していたが、その他の項目では改善効果が見られ、特に自転車通行帯は危険性低下が現れている。死角並走時については、自動車と自転車の間隔に余裕ができることが安全性へ影響したと考えられる。廻り込み走行については、J2では不十分な幅寄せで廻り込み走行を許しやすい点もあり、改善傾向は明らかでないが、J3では自転車通行帯を意識することで一時停止の位置が手前になり錯綜の抑制につながるケースが見られた。

セットバック拡大J4については、廻り込み走行では多少の改善が見られたが、死角並走では危険性が悪化した。廻り込み走行時は、左折完了状態で一時停止して自転車と正対するため、自動車確認の負荷が軽減することが要因として考えられる。逆に、死角並走については、横断帯が遠くなることで自動車の周辺への意識が薄まることで影響していると考えられる。

隅角部形状については、隅角部縮小J6は廻り込み走行では特に変化は見られなかったが、死角並走については危険性低下が見られた。隅角部が狭いことに加え、左折が大回りになったことが巻き込みの抑制につながったと推察される。この形状では、不安感を高く感じる割合が多く、自転車へ意識が集中していることが推察される。一方、隅角部拡大J5は、両走行パターン共に危険性が高まっている。隅角部が広くなると隅角部に近く左折することで、錯綜時に自転車と接近すること、車道上で自転車が自由走行できるスペースが大きくなることが要因と思われる。

プロテクテッド型交差点の評価に関しては、手引き型はすべての交差点形状において標準形の自歩道走行よりも危険性の改善が見られた。特に、セットバックを5mにしたP3では、危険TTCの発生率が減少しており、自転車の不安感も改善している。セットバックが大きい形状で危険性が低下したのは、自転車がシフトして走行する時間が長くなり、自動車が自転車の位置を認識する猶予が生まれていることが要因と考えられる。NACTO型は、隅角部標準でセットバック3mのP4で安全向上効果が大きい。一方で、隅角部拡大のP7では、危険TTC発生率に変化は見られなかった。隅角部は狭いほうが大回りな左折を促し、自転車を視認する余裕が生まれるためと思われる。

今後の課題として、以下があげられる。今回評価した走行パターン以外の検討が今後必要である。またプロテクテッド型交差点の整備には、広い走行空間が必要となるため、そのスペースを十分に用意できない場合の改善策の検討も今後の課題としてあげられる。

さらに近年のIT技術の進歩により提案されるようになった車両にセンサーを搭載し、自動車の死角に自転車が進入した場合にアラームなどで運転手に危険を知らせる機能のように、IT技術の効果の検討も期待される。

本研究では、CSを用いて自動車・自転車操作者の双方を実験者として実験を行ったが、危険な錯綜を再現するために自転車に危険な走行を強いること、自動車の注意をできなくしたり、注意をそらすなどの操作を行っていることから、実際の運転挙動とは異なる点を考慮すべきである。

参考文献

- 1) 国土交通省自転車活用推進本部:自転車活用推進計画 2018年, https://www.mlit.go.jp/road/bicycleuse/good-cycle-japan/assets/pdf/jitensha_katsuyo.pdf
- 2) 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年, https://www.mlit.go.jp/road/bicycleuse/good-cycle-japan/assets/pdf/jitensha_katsuyo_local.pdf
- 3) 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, 2012年, 2016年改定
- 4) 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年, 2019年改定
- 5) 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 第45回土木計画学研究発表会・講演集(CD-ROM), 2012年.
- 6) 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, Vol. 34, pp. 531-536, 2014.
- 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 D3 (土木計画学), 73巻, 5号, pp. I_717-I_722, 2017.
- 8) 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.
- 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, https://doi.org/10.34398/kokaken.51.2_28
- 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, https://doi.org/10.14954/jste.8.2_A_273
- 11) 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.
- 12) 山田一太, 山中英生, 吉田長裕, 松本修一: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, 土木計画学研究・講演集, Vol. 65, CD-ROM, 2022.
- 13) 山田一太, 山中英生, 吉田長裕, 松本修一: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直進自転車の安全性評価—交差点施策の効果について—, 土木計画学研究・講演集, Vol. 67, CD-ROM, 2023.
- 14) NACTO (National Association of City Transportation Officials): Don't Give Up at the Intersection, 2019, <https://nacto.org/publication/dont-give-up-at-the-intersection/>

第6章 実験に基づいた車道上の自転車の安全改善策と持続可能な安全向上策の検討

6.1 交通安全向上策のまとめ：大規模信号交差点

(1)大規模信号交差点における観測・分析結果のまとめ

表-6.1に観測調査から得られた評価結果を整理している。

(2) 大規模信号交差点における左折自動車・直進自転車の実験結果のまとめ

表-6.2にシミュレーション実験で得られた評価結果を整理している。

(3) 観測調査とシミュレーション結果のまとめ

a) 自転車の車道通行時の対策

自転車通行空間を拡幅したJ2, J3の両形態ともに、廻り込み走行時の接近速度は増加していたが、その他の項目では改善効果が見られ、特に自転車通行帯は危険性低下が現れている。死角並走時については自動車と自転車の間隔に余裕ができることが安全性へ影響したと考えられる。廻り込み走行についてはJ2では不十分な幅寄せで廻り込み走行を許しやすい点もあり改善傾向は明らかでないが、J3では自転車

通行帯を意識することで一時停止の位置が手前になり錯綜の抑制につながるケースが見られた。

セットバック拡大J4については、廻り込み走行では多少の改善が見られたが、死角並走では危険性が悪化した。廻り込み走行時は左折完了状態で一時停止して自転車と正対するため、自動車確認の負荷が軽減することが要因として考えられる。逆に死角並走については横断帯が遠くなることで自動車の周辺への意識が薄まることの影響していると考えられる。この結果については、観測調査による複数台の自転車の存在がTTCを悪化することに繋がっていたことから支持される結果である。

隅角部形状について、隅角部縮小J6は廻り込み走行では特に変化は見られなかったが、死角並走については危険性低下が見られた。隅角部が狭いことから左折が大回りになり巻き込みの抑制につながったと推察される。この形状では不安感を高く感じる割合が多く、自転車へ意識が集中していることが推察される。隅角部が大きい場合には、左折車の交差点進入速度の低下が危険度を低減することに寄与していることが観測結果から支持できる。一方、隅角部拡大J5は、両走行パターン共に危険性が高まっている

表-6.1 評価結果のまとめ

	分析結果	対策要素案
自転車	(歩道通行) ・横断方向から流入する自転車の場合に TTC が低い ・順走方向から流入する複数自転車による錯綜地点の不明確さ (車道通行) ・左側端通行時の左折車死角の認識不足 ・左側端通行時の左折車に対する優先・非優先が不明確	・一方向通行化、交差点流入部(信号待ちスペース)の明確化 ・複数自転車が同時に交差点流入できないような自転車通行帯幅員 ・交通安全教育 ・自転車通行帯(矢羽根)+自転車専用信号 or 自転車通行帯+横断帯(セットバック長大)
左折車	・進入速度のバラツキ ・通行位置のバラツキ	・左折車線幅員の縮小、セットバック長の縮小、隅切半径縮小 ・交差点内における左折車の通行位置明示のための導流帯、大型車対応隅角部エプロン ¹²⁾

表-6.2 評価結果のまとめ

交通安全対策		自転車の走行	TTC発生率からみた安全性	接近速度	衝突方向	自動車の不安感	自転車の不安感
標準形との比較	J2 通行帯拡幅	死角並走	○	◎	—	○	◎
		廻り込み走行	—	×	○	—	×
	J3 自転車通行帯	死角並走	◎	—	○	◎	◎
		廻り込み走行	◎	×	○	—	○
	J4 セットバック5m	死角並走	×	—	—	×	×
		廻り込み走行	○	—	—	○	×
	J5 隅角部縮小	死角並走	◎	○	○	◎	◎
		廻り込み走行	—	—	—	○	○
J6 隅角部拡大	死角並走	×	◎	—	—	—	
	廻り込み走行	×	×	—	—	—	
走行標準形の自歩道比較	P2 手引型 SB3m	自転車通行帯走行	○	—	—	◎	◎
	P3 手引き型 SB5m	自転車通行帯走行	◎	—	—	◎	◎◎
	P6 手引型 隅角縮小	自転車通行帯走行	○	—	—	◎◎	◎
	P4 NACTO型 SB3m	自転車通行帯走行	◎	—	—	◎	◎
	P5 NACTO型 SB5m	自転車通行帯走行	○	—	—	◎	◎
	P7 NACTO型 隅角拡大	自転車通行帯走行	—	—	—	○	◎

<凡例> ◎◎：明らかな改善効果が見られる，◎：改善効果が見られる，○：改善効果が示唆されるが明確ではない，×：改悪効果が見られる，—：改善・改悪の変化は不明

表-6.3 具体設計要素の提案

道路構造	交通条件	設計要素の提案
複数車線で構成される自動車の交差点流入部（大規模交差点）	<ul style="list-style-type: none"> ・交差点流入路別需要率(容量) ・左折大型車交通量 ・左折車の走行速度 ・自転車交通量 	<ul style="list-style-type: none"> ・左折車速度を低減するための自動車車線幅員の縮小と自転車通行帯幅員の確保（横断面の空間再配分，車道混在ではなく自転車通行帯最小幅員を確保） ・左折車車線と自転車通行帯の間にゼブラゾーンを設け通行帯の離隔をとり，自転車廻り込み・並走による見落としを防止（横断面の空間再配分，大型車からの左後方の死角を防ぐためのミラー設置） ・左折車及び錯綜自転車の速度を低減するための交差点部のマウンドアップ（歩行者・自転車横断部を含む） ・左折車速度を低減するための隅切半径の縮小（大型車エプロンの採用） ・自転車通行帯と自転車横断帯とのセットバック確保（ショートカット走行ができないよう縁石を使った通行帯・横断帯のシフト） ・自転車速度を低減するための自転車横断帯接続部の縮小 ・自転車通行帯と自転車専用信号の導入による時間分離 ・自転車の信号無視や誤認，無理な交差点進入を防ぐための自転車専用信号設置（設置位置・形状変更・レンズ面） ・スマートポールによる車車間通信のインフラ協調介入：左折車との錯綜イベントを自転車利用者へ通知（注意喚起のみ），左折車のHMIを通じた錯綜自転車の存在通知，左折車のセンサーによる錯綜自転車検知による衝突軽減ブレーキ作動

る。隅角部が広くなると隅角部に近く左折することで、錯綜時に自転車と接近すること、車道上で自転車が自由走行できるスペースが大きくなることが要因と思われる。この結果についても、観測結果における左折車、自転車の速度が危険度を悪化させるものとして支持することができる。

b) プロテクト型交差点の評価

手引き型はすべての交差点形状において標準形の自歩道走行よりも危険性の改善が見られた。特にセットバックを5mにしたP3では危険TTCの発生率が減少しており、自転車の不安感も改善している。セットバックが大きい形状で危険性が低下したのは、自転車がシフトして走行する時間が長くなり、自動車が自転車の位置を認識する猶予が生まれていることが要因と考えられる。観測結果では、現状の自歩道における双方方向かつ自転車通行位置や交差点流入地点、錯綜地点がまちまちであったものが、プロテクト型により、交差点流入位置と錯綜地点が明確化されることの効果が大きく、自転車と左折車との間の離隔距離が一定程度保った状態で錯綜地点に到達する効果も大きいものと考えられる。

NACTO型は隅角部標準でセットバック3mのP4で安全向上効果が大きい。一方で隅角部拡大のP7では危険TTC発生率に改善が見られなかった。狭い隅角部で大回りな左折で自転車を視認する余裕が生まれることが要因だと思われる。

c) 事故対策案の提案

道路構造と交通の条件に応じた実行可能な事故対策案、自転車交通を考慮した道路設計の考え方とその具体設計案を表-6.3に提案する。なお、この対策に関わる設計要素については、シミュレータ実験によって導きだされた結論に基づいて、自転車及び左折車の速度、通行位置を制御に寄与するものを中心に取り上げたが、これらが他の交通流へ与える影響については十分な検証がとれていないことに留意が必要である。また、車両における先端技術の導入（衝突軽減ブレーキ等）についても幅広に含めたが、予備的な検討を加えた結果によれば、交差点隅角部に電柱などの障害物が存在する場合や、交差点隅角部が鋭角の場合には、衝突軽減ブレーキに関わるセンサーの範囲外になることや、錯綜直前まで対象を把握できないことが起き得ることから、注意が必要である。なお、こういった条件への対応としては、自転車ITSやスマートポールによるインフラ協調システムの実験が進められており、新たなシステムでどの程度の対応可能か検討する必要がある。

d) 今後の課題

死角並走、廻り込み走行時の危険性に交差点形状が与える影響については明らかになったが、その他の走行パターンや交差点形状（空間的余裕のない信号交差点）についても、検討が必要である。プロテクト型の安全性が明らかになったが、整備には広い歩行部空間が必要とされるため、スペースの無

い交差点における改善策を検討する必要がある。また、プロテクト型の隅角部においては、海外において大型車用のエプロンを採用することによって小型車・大型車ともに速度を下げることに寄与するものとして期待されていることから、対策の効果をシミュレーション上で明らかにした上で簡易的なもので効果の検証を行うことが望ましい。

シミュレータ実験では被験者の慣れが課題として挙げられており、本研究では二重課題法やダミーケース挿入によって被験者の慣れの低減を図ったが、更なる検討も求められる。

本研究ではCCSを用いて自動車・自転車の双方を操作者を実験者として実験を行ったが、危険な錯綜を再現するために自転車に危険な走行を強いることや、自動車の注意をできなくすることや、そらすなどの操作を行っていることから、実際の運転挙動とは異なる点を考慮すべきである。観測調査やヒヤリハットデータ、事故データにおいては、このような自転車利用者の運転挙動の関与が実際に多くあるものと推察されるが、主に交差点流入における対左折車との優先・非優先のルール、安全教育の影響も考えられること、プロテクト型によってより自転車の優先意識の上昇が想定されることから、こういった利用空間と利用者の心理面への影響についても考慮した実験を行う必要がある。

6.2 交通安全向上策のまとめ：単路・トンネル

交通事故データからは、交差点以外で重大事故が高まるのはトンネル区間であることが明らかとなった。この結果を受けてプローブ自転車を使った観測調査では、単路・トンネル区間における走行自転車に対する追越自動車の速度と離隔距離の関係から危険度評価を行った。その結果、車道幅員がトンネル外に比べて狭くなるトンネル区間では、とくに大型車の速度が注意喚起を行っても低下しない傾向があり、またシミュレータの結果では、高齢者と若者の間に自転車追越の運転行動（速度）に違いがみられ、自車走行位置、矢羽根設置による離隔距離への効果、車線幅員の構成や中央線の規制の有無、対向車の有無が影響することが示唆された。本調査研究では、トンネル内自転車通行の注意喚起システムによる速度低下の効果を確認したが、より効果的な注意喚起のあり方や条件の組み合わせについては明らかになっておらず、引き続き、シミュレーション実験を行う必要がある。

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

成果報告レポート

No.2020.5

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

2024.5