

令和3年度「交通安全等に関する公募による委託調査研究」

ドライブレコーダのデータ分析に基づく潜在リスクマップ構築手法と
それを活用した高度安全運転支援への応用に関する研究

研究代表者

東京農工大学

大学院工学研究院 先端機械システム部門 教授

ポンサトーン・ラクシンチャーンサク

2022年3月31日

令和3年度「交通安全等に関する公募による委託調査研究」

課題名：ドライブレコーダのデータ分析に基づく潜在リスクマップ構築手法とそれを活用した高度安全運転支援への応用に関する研究

調査研究の要旨

本調査研究は、右折時の安全性向上に寄与する研究開発に関するものである。本研究では、一般道の交差点等における右折場面に着目し、実際の交差点を運転した際の運転行動データおよび周辺の道路環境情報から、顕在・潜在リスクを合理的に予測するモデルの構築を目指し、実路データに基づき、リスクの高い右折場面の特徴を分析する。また、右折時の安全走行速度演算モデルを定式化し、安全運転のためのブレーキ支援制御システム(リスクレジリエンスコントロール)を開発することを研究の目的とする。

本報告書の前半では、タクシー車両に取り付けられたドライブレコーダから得られた右折ヒヤリハットデータを抽出し、走行空間内の静的な環境文脈パラメータ(道路形状、車線数、歩道、標識等)および動的な交通外乱(交通参加者の飛び出し速度および相対距離等)に対して、走行環境リスクを客観的に評価する指標を使って、右折時に注意すべき点について分析した。

本報告書の後半では、右折時の衝突リスクを算出する方法として、物理的な意味を持つ「衝突速度の推定値」を算出し、衝突速度が低くなるように「適正な安全速度」を算出する手法を提案する。コンピュータシミュレーションを使って、危険場面を再現し、速度超過分を抑制する減速支援システム(リスクレジリエンスコントロール Risk Resilience Control: リスク回復制御)を設計し、そのシステムの安全性向上に対する有効性を検証した。具体的には、衝突速度をリスクとして現在の自車両および対象車両の速度、位置、角度の情報から衝突速度を理論的に推定し、実際のヒヤリハットのケースをシミュレーション上で再現することで衝突速度計算手法により実際のヒヤリハットケースのリスクを推定した。また、危険度の高い場面に対し緩ブレーキ支援を行うシステムを導入することで、急ブレーキを行わずに交差点での安全な通行を示した。早い段階での減速支援を行うことで予測される衝突速度の減少と高い衝突余裕時間の確保が可能になったと確認できた。

目次

第1章 本調査の背景・目的	5
1.1 はじめに	5
1.2 社会的背景	5
1.3 工学的背景	6
参考文献	14
第2章 右折場面におけるドライブレコーダのデータ分析	15
2.1 はじめに	15
2.2 ドライブレコーダ記録映像による右折場面の分析	15
2.3 ヒヤリハットデータベースによる右折場面の特徴	18
2.4 距離計測による高リスク場面の抽出	19
2.5 潜在リスクレベルの定量化	21
2.6 高リスク場面に関するアノテーションの設定	23
2.7 まとめ	26
参考文献	26

第3章 衝突速度計算による交差点右折時のリスク評価と減速支援効果の検証	27
3.1 はじめに	27
3.2 衝突速度計算理論	27
3.3 衝突速度計算用データの準備	28
3.4 ヒヤリハットデータベースのヒヤリハット事例を用いた衝突速度予測	29
3.5 減速支援効果の検証	33
3.6 結論	37
第4章 結論	38

第 1 章

本調査の背景・目的

1.1 はじめに

本章では，本研究の背景について述べる．まず 1.2 項にて交通事故分析から社会的な研究背景について述べ，1.3 項にて工学的な研究背景について述べる．

1.2 社会的背景

近年，日本の自動車乗車中における死亡者数は減少傾向にあるものの，依然として高い水準となっており，歩行中の死者数と自動車乗車中の死者数が大きな割合を占めていることがわかる．道路形状別の交通事故件数を見ると，交差点内における事故が全体の 4 割以上を占め，交差点付近を含めると交差点における交通事故は全体の約 6 割を占めており，交差点に関連した事故の削減が急務であるといえる．交差点における事故に着目し，交差点における 1 当四輪車行動類型別事故件数を見てみると，1 当四輪車の右折時における事故が最も多いことがわかる．表 1 をみても，右折対直進の事故は死傷事故件数，死亡重傷事故件数，死亡重傷事故割合の項目でいずれも上位であり，課題の一つであることがわかります．

交通事故分析センターの分析によると，四輪車同士の右直事故の年齢層別の第 1 当事者による人的要因を図 1.1 に示す[1]．道路環境における他の交通参加者等に意識が取られ発見の遅れや判断の誤りが多いことがわかった．国内での交差点における右直事故のデータ分析や運転行動分析は，これまでも多く行われてきた．藤田らによる信号交差点通過時の右直ヒヤリハットデータの分析によると，右直ヒヤリハットは対向直進車間を右折するという状況と信号が黄信号から赤信号に変化した直後が多いこと，対向直進車の前車と後車の間に速度差がある場合，後車への注視時間が減少し，後車の到達時間の予測に影響を与える可能性があることが報告されている[2]．右折事故の多くは当事者の双方が青信号で交差点に進入し事故を起こしていることから，

右折事故はドライバーが対向車を認識できなかった場合に加えて、右左折の可否に対するドライバーの判断ミス（例えば、「先に行ける」と判断してしまったなど）が原因であると考えられる。また、追突や正面衝突に比べて、右折事故は発見の遅れが原因となったケースが多いことが報告された。

表 1 四輪車同士の事故類型別の事故件数と死亡重傷事故割合
(マクロデータ (2009-2018 年)) [1]

	死傷事故件数	死亡重傷事故件数	死亡重傷事故割合(%)
正面衝突	④ 95,988	② 19,224	① 20.0
追突	① 1,942,032	③ 19,217	1.0
出会い頭	② 640,099	① 29,167	③ 4.6
左折時	22,031	446	2.0
右折時	③ 123,680	④ 8,537	② 6.9
右折対直進	38,490	859	2.2
その他	26,383	712	2.7
追越追抜時	30,838	1,099	④ 3.6
すれ違い時	283,024	5,914	2.1
その他			

[表1の○数字は、各項目の上位からの順位を表す(その他を除く)]

(出典：交通事故分析センター ITARDA Information No. 136)

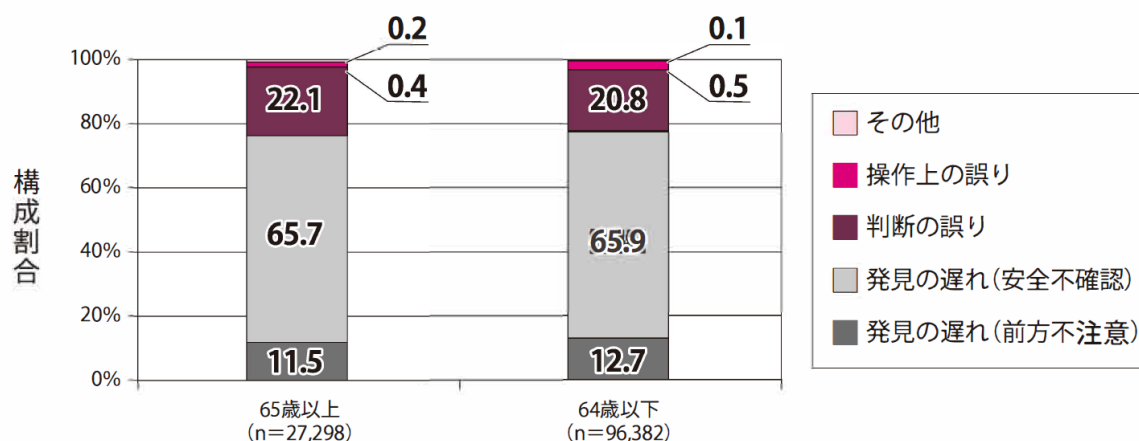


図 1.1 四輪車同士の右直事故の年齢層別の第 1 当事者による人的要因 (マクロデータ 2009-2018 年) (出典：交通事故分析センター ITARDA Information No. 136) [1]

1.3 工学的背景

近年、衝突安全技術に加え、事故を未然に防ぐ予防安全技術の開発が盛んに行われ、実用化されている。現在実用化されている代表的な予防安全技術としては、アダプテ

ィブクルーズコントロールやレーンキープアシスト，衝突被害軽減ブレーキなどが挙げられる．アダプティブクルーズコントロールは，車両の前方に搭載したレーダを用いて，前方を走行する車両との車間距離を一定に保ち，必要に応じてドライバへの警告を行うシステムである．レーンキープアシストは，車両の前方に取り付けられたカメラ等を利用して道路の白線などの走行環境を検知し，車両が走行車線を維持するように，ハンドル操作を支援するシステムである．衝突被害軽減ブレーキは，車両の前方に取り付けられたカメラやレーダを利用して前方の障害物を検知し，ドライバへ警告および自動ブレーキを行うシステムである．

近年では，中低速域までにおいては前方の障害物との完全に回避する性能を備えた衝突被害軽減ブレーキが実用化されている．衝突被害軽減ブレーキシステムの例として，EyeSight（スバル社）のイメージを図 1.2 に，Human Safety のイメージを図 1.3 に，Toyota Safety Sense のイメージを図 1.4 に示す．



図 1.2 安全運転支援システム
(出典：スバル Eyesight X)

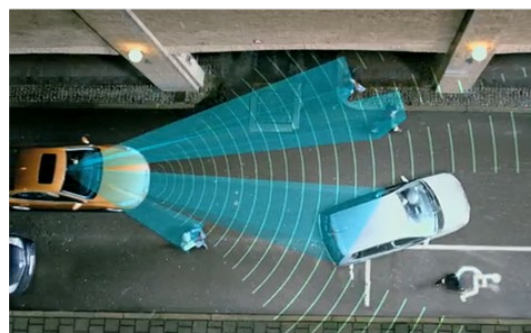


図 1.3 安全運転支援システム
(VOLVO)

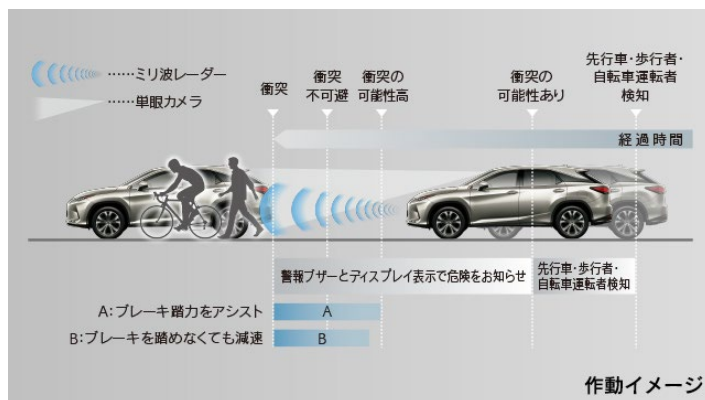


図 1.4 安全運転支援システム (出典：Lexus Safety System)

さらに近年では、交差点における対向車との衝突事故を防止するための運転支援システムの開発がさかんに行われており、トヨタ自動車や Volvo Cars 社が今後発売する市販車両への搭載を発表している。一例としてトヨタ自動車が開発を行っているインフラ協調型右折時衝突防止システムの概要を図 1.5 に示す。

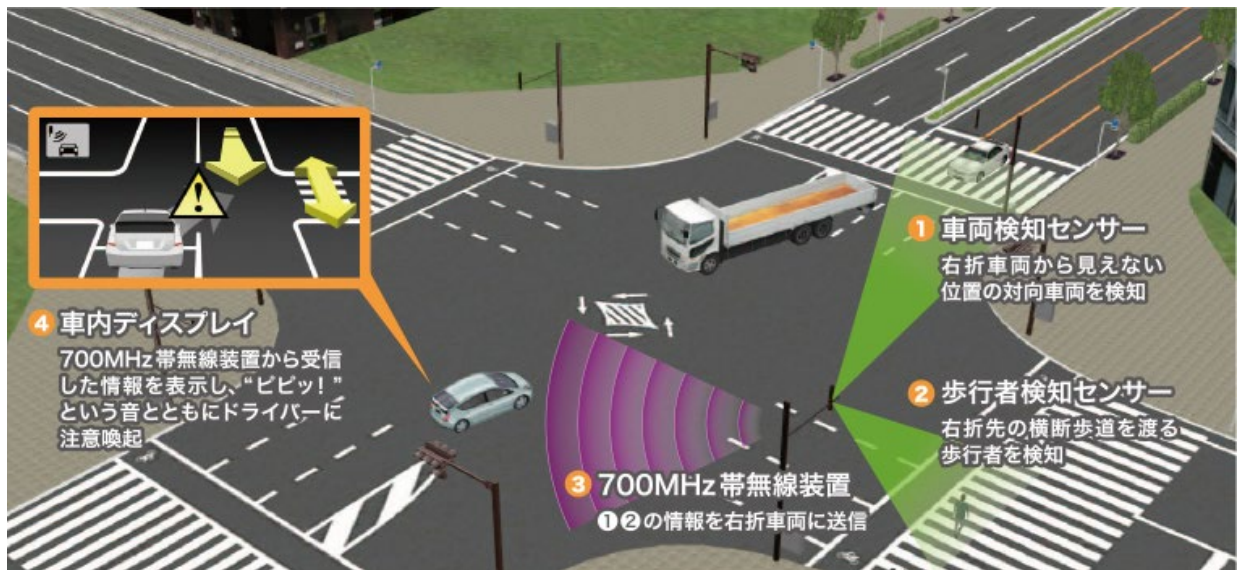


図 1.5 インフラ協調の運転支援システム

インフラ協調型右折時衝突防止システムは、路車間通信を使用することで、交差点内で右折待ちを行っている車両に対して対向車についての情報提供や警告を行うシステムである[3][4][5]。システムの概略は次の通りである。

- ①道路側に設置された車両検知センサにより、対向車の有無を検知する
- ②700MHz帯高度道路交通情報システムの周波数帯を用いて、道路に設置されたビーコンから、右折待ち車両へ検知結果を送信する
- ③右折待ち車両は受信機によって対向車の検知結果を取得する。対向車が交差点中心に到達するまでの時間が6秒以上の場合に、ドライバーが停止状態からブレーキを離すとディスプレイ表示を用いてドライバーへ注意喚起を行う。対向車が交差点中心に到達するまでの時間が6秒以下の場合に、ドライバーが停止状態からブレーキを離すとディスプレイ表示と警報音を用いて、ドライバーへ警報を行う

インフラ協調型右折時衝突事故防止システムは、2012 年から、約 100 名の一般ドライバーに対して、6 交差点で公道実験が行われてきた。トヨタ自動車は 2015 年から発売する車両の一部にインフラ協調型右折時衝突防止システムを導入することを発表している。これまでも路車間通信を用いた交差点右折時における衝突事故防止技術の研究開発が行われており、他の研究機関でも実用化が進められている。

VolvoCars 社が開発した City Safety に実装されている Auto Brake at Intersections およびトヨタの最新の SAFETY SENSE の概要を図 1.6 に、車両に搭載されているセンサを図 1.7 に示す。



図 1.6 交差点対応の緊急自動ブレーキシステムの商品化の例

(出典：VOLVO, トヨタ自動車株式会社)



図 1.7 運転支援システムのセンサ認識系 (出典：VOLVO)

City Safety は、車両前方に搭載されたミリ波レーダ、カメラ、赤外線レーダを用いて対向車を検知し、自車が対向車の前を通過しようとした場合には、自動ブレーキを作動させることにより、対向車との衝突回避を行うシステムである。赤外線レーダとカメラは車両のフロントウィンドウ上部に設置されており、RACam (Integrated radar and camera sensor fusion system) と呼ばれるシステムによって統合されている。ミリ波レ

ーダは 76GHz の短距離レーダが使用されており，車両の前部に設置されている．VolvoCars 社は 2014 年以降に発売する車両に Automatic Brake at Intersections を備えた City Safety を導入することを発表している．

また，欧州では EU のフレームワークプログラムにおける PReVENT プロジェクトの一環として，交差点事故を防止する予防安全技術の開発を目的とした INTERSAFE プロジェクトが実施されてきた．INTERSAFE は第 6 期欧州フレームワークプログラムの一環として 2004 年から 2007 年まで行われ，その後 INTERSAFE2 が第 7 期欧州フレームワークプログラムの一環として 2008 年から 2011 年まで実施された．INTERSAFE2 プロジェクトには，SICK, BMW, IKA, INIRIA, NEC, Signalbau Huber, TRW, Cluj-Napoca 大学, VTEC, VTT, Volkswagen が参加しており，欧州全体からメーカーや研究機関が集まっている．INTERSAFE2 プロジェクトで使用された実験車両の概要を図 1.8 に，センサの検知範囲を図 1.9 に示す．



図 1.8 INTERSAFE2 プロジェクト実験車両

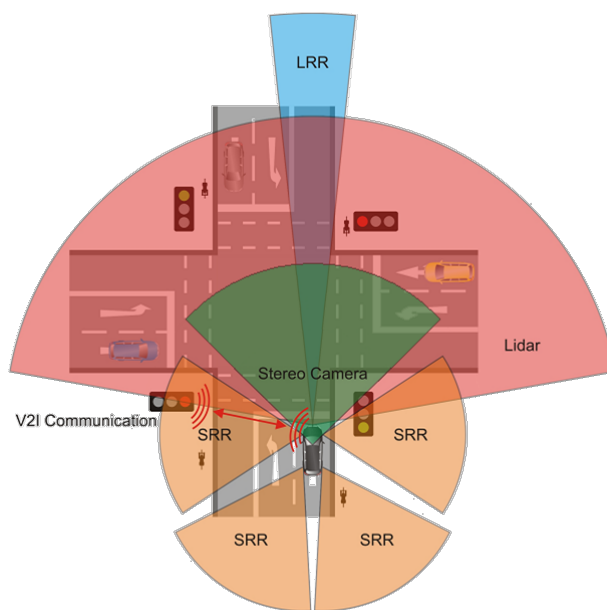


図 1.9 全方位安全運支援システムのセンサの認識範囲

実験車両には，前方にステレオカメラ，Lidar，77GHz ミリ波レーダ（LRR）が設置され，左右側面および後方に 24GHz ミリ波レーダ（SRR）が搭載されている．さらに路車間通信のための V2I 通信装置が搭載されており，車載センサを用いた自律的な交差点事故防止システムと，路車間通信を用いた交差点事故防止システムを組み合わせた事故防止システムの開発が行われている．

米国では，カルフォニア PATH プログラム（Partners for Advanced Transportation Technology）の一環として，路車間通信を用いた交差点事故防止に関する研究が進められてきた．PATH プログラムで使用された実験車両を図 1.10 に示す．



図 1.10 米国における California PATH project の実験車両

実験車両には GPS、データ記録装置、ドライバ視線観測装置、カメラが設置されており、車両の前後にレーダを搭載している。図 1.10 に示す実験車両を用いて走行データを収集し、交差点におけるドライバの運転行動解析を行っている。路車間通信を用いた交差点事故防止システムでは、自車両および道路側インフラから取得したデータを基に左折の可否判断を行い、信号機横に設置された表示機を用いてドライバへ情報提供を行うシステムが研究されている。

また、アメリカ合衆国運輸省の ITS プログラムにおいては、CICAS（Cooperative Intersection Collision Avoidance Systems）に関する研究が進められてきた。CICAS における交差点左折時の事故防止システムの概要を図 1.11 に示す。CICAS では、車載センサを用いた事故防止システム、道路インフラを用いた事故防止システムの開発が行われている。路車間通信を使用しない事故防止システムとしては、道路に設置され

たセンサを用いて車両を検出し，交差点の信号が青の場合でも，対向車が存在する場合には，信号の横に左折禁止表示を提示するシステムが研究されている．車両側の装備が不要なため，道路インフラの整備のみでシステムを使用できる利点がある．

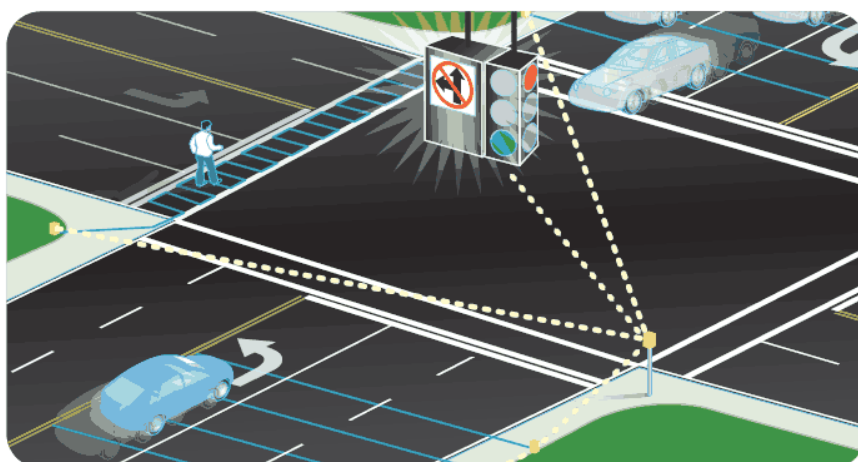


図 1.11 Signalized Left Turn Assist System in CICAS project

1.4 本調査研究の目的

右折時の衝突回避システムの技術的課題の一つとして，図 1.12 に示されるように「何かの陰になって見えなかった」要因に対する対策が考えられる．突然死角となった物陰からの対向車，二輪車等に対する事故防止策が重要である．本調査研究ではそういったリスクが高い場面において，ヒヤリハットデータ解析から得られた知見を見出すことと，リスクを低減するブレーキ支援制御システムの設計論および検証を目的とする．

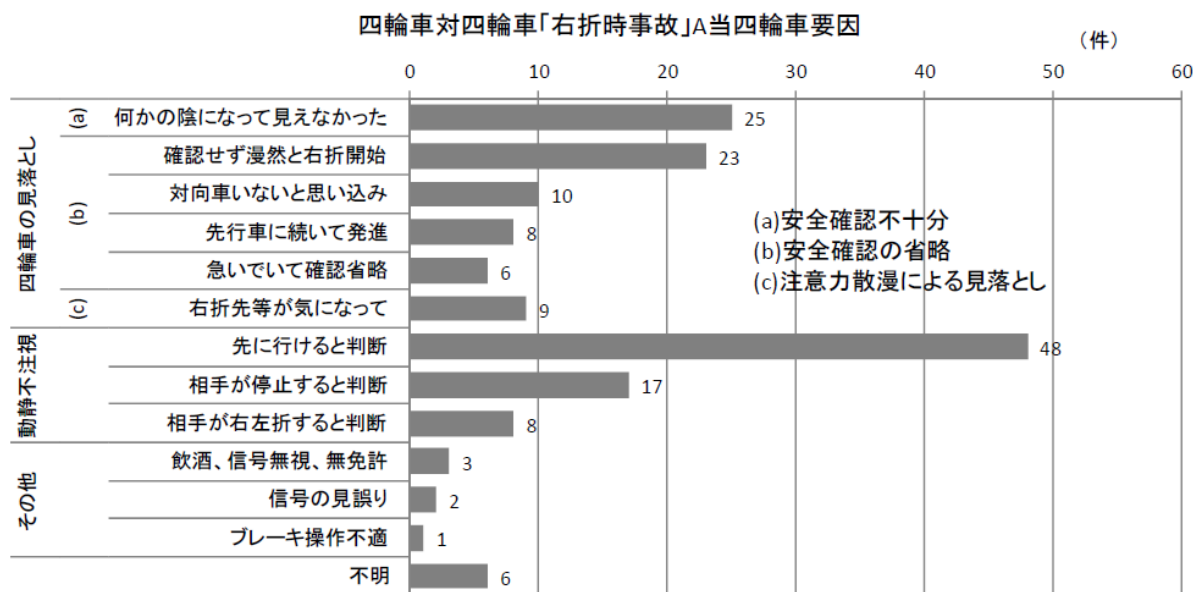


図 1.12 四輪車同士の右折時事故の要因

参考文献

- [1] 交通事故総合分析センター，四輪車同士の右折対直進の事故，イタルダ・インフォメーション No. 136, 2020 . <https://www.itarda.or.jp/contents/8941/info136.pdf> (2022/03/14 アクセス).
- [2] 藤田浩徳，小竹元基，鎌田実，永井正夫，茂呂克巳，” 信号交差点通過時のヒヤリハットデータに基づく運転行動分析”，自動車技術会学術講演会前刷集，No.98-10 (2010)，pp.17-20
- [3] 中村俊祐，菅沼英明，菊地一範，本間亮平，” インフラ協調型右折時衝突防止支援システムの効果評価”，自動車技術会学術講演会前刷集，No.49-14 (2014)，pp.23-28
- [4] 鈴木桂輔，井田雄也，山田喜一，” 交差点右折ドライバモデルの構築と右折時衝突防止支援情報による事故低減効果の分析”，自動車技術会論文集，Vol.40 Vo.3 (2009)，pp.925-932
- [5] 大谷亮，岩城亮，中村之信，” インフラ協調型安全運転支援システムの表示インターフェイスに関する研究（第 4 報）”，自動車技術会学術講演会前刷集，No101-11(2011)，pp.7-12

第 2 章

右折場面におけるドライブレコーダのデータ分析

2.1 はじめに

本章では、東京農工大学スマートモビリティ研究拠点で収集したドライブレコーダの走行データを用いて、交差点の右折場面における急ブレーキポイントがどのような場面で起きているのか分析を行う。また、収集したデータから高リスク場面を抽出し、リスクの高い場面の特徴(道路標識、周辺車両、歩行者等)を解析する。

具体的には図 2.1 で示すように、初めにドライブレコーダの走行データから右折場面におけるデータについて分析する。次に、右折場面における自動車とのヒヤリハット場面に絞り距離測定を行う。その後、距離測定により導出された高リスクデータについて詳細分析を行う。

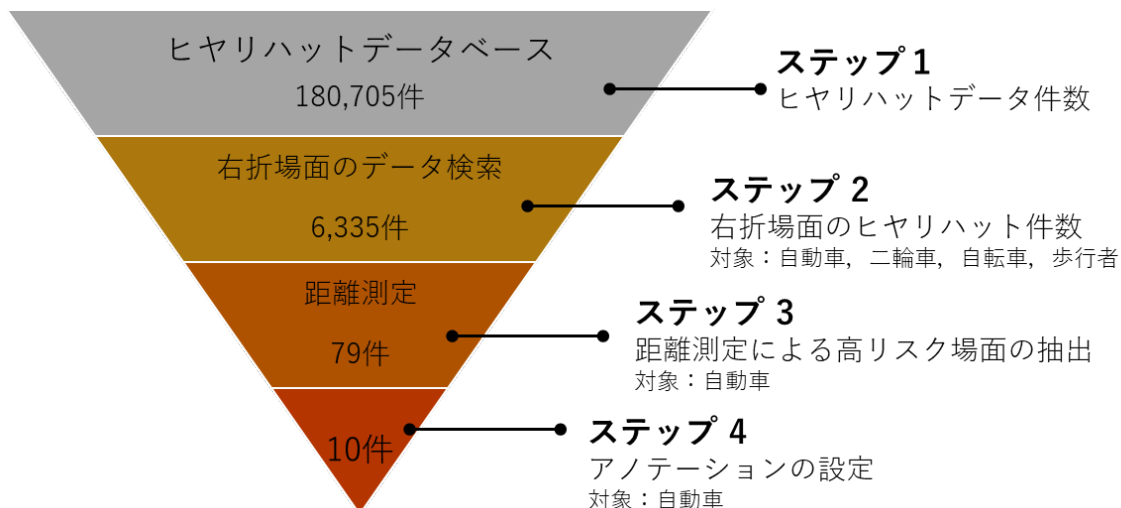


図 2.1 本研究のフロー図

2.2 ドライブレコーダ記録映像による右折場面の分析

本研究では、東京農工大学 Smart Mobility Research Center (SMRC) が所有するヒヤリハットデータベースを用いて分析を行う。ヒヤリハットデータベースとは、東京、札幌、秋田、静岡、福岡の各地域で撮影されたタクシーのドライブレコーダから収集した映像データと物理データに、分析者がタグ情報を付加したものである¹⁾。ヒヤリハットデータは約 180,000 件（2020 年 11 月現在）のビッグデータであり、ヒヤリハットが発生した時刻の 10 秒前から発生時刻 5 秒後までの映像と車両速度、加速度、GPS 情報、ペダル操作の有無などで構成されている。ヒヤリハットデータは SMRC が製作した「DR manager 2」にて検索することが可能である(図 2.2)。

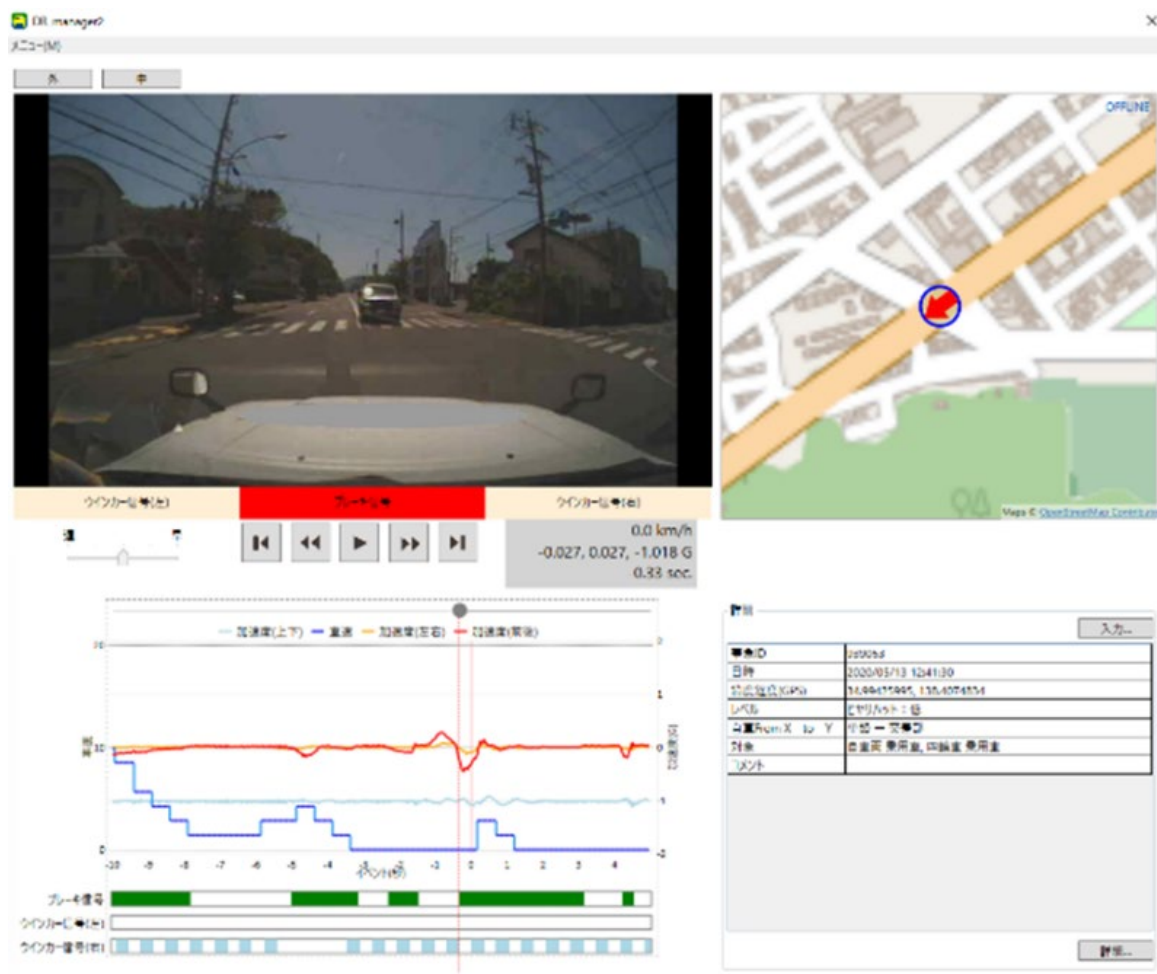


図 2.2 DR manager2

最初に、ヒヤリハットデータベースから「自車が右折時の対向直進車」についてデータを検索した。分類方法は交通事故総合分析センター（2012）² を参考にし、図 2.3 に示すように、自動車、二輪車、自転車、歩行者の場合について、それぞれ検索した。二輪車と自転車については、対向直進車の死角から飛び出した場合も検索し、歩行者については、自動車の右折先の横断歩道を横断する際のヒヤリハット場面を検索した。

なお、DR manager 2 による検索設定は以下の通りである。

図 2.3 DR manager 2 検索画面

【DR Manager 2 での検索設定】

1. 発生年月日： 2005/1/24~2020/11/22
2. 事故キーワード：右直
3. 地域：東京，札幌，秋田，静岡，福岡
4. ヒヤリハットレベル：高レベル，中レベル，低レベル

著者が使用許諾を受けているデータは 2005 年から 2020 年に計測された 180,705 件である。

ヒヤリハットレベルとは，SMRC で定義したタグ情報であり，本研究でのリスクレベルとは関係はない

【その他の条件】

- 死角からの二輪車，自転車は，側方通過種別「追越，追抜，すりぬけ」のタグ付けがされているインシデント動画を目視で確認した。
- 右折先横断歩道の自転車，歩行者は，「横断者」をキーワードに，自車両が右折中の場合を検索し，その後インシデント動画を目視で確認した。

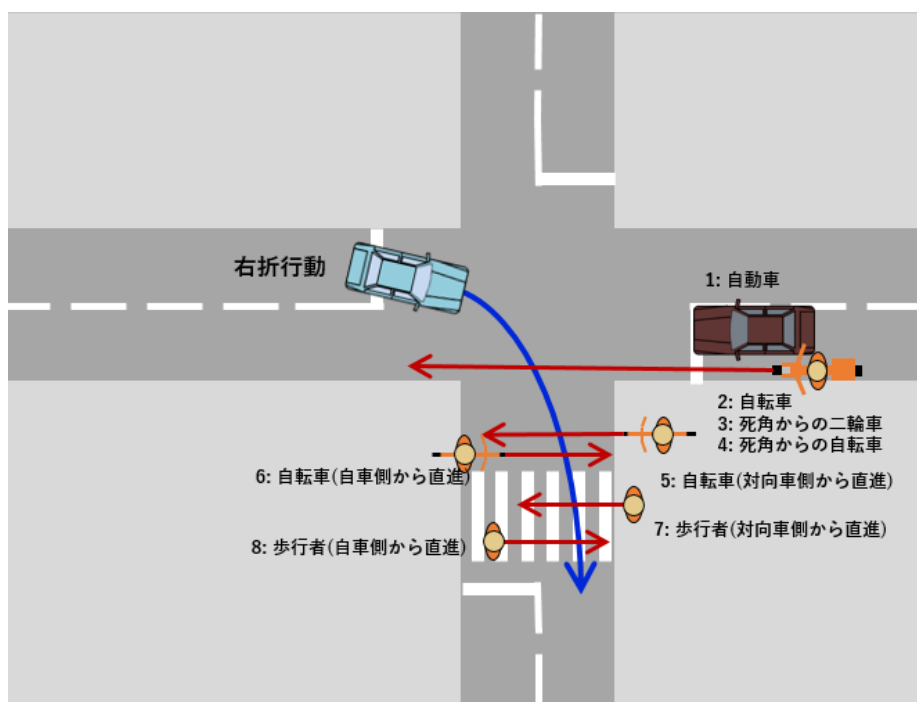


図 2.4 ヒヤリハットデータベースによる右折場面の分析対象

2.3 ヒヤリハットデータベースによる右折場面の特徴

ヒヤリハットデータベースによる対向直進車の状況別ヒヤリハット件数を表 2.1 に示す。全体で 6,335 件のヒヤリハットデータが確認された。対向直進車の状況 1 及び 2 は、自車が右折時にそれぞれ自動車や二輪車と接触しそうになった場合で自動車 4,618 件、二輪車 469 件であった。対向直進車の状況 3 及び 4 は、自車が交差点右折時に、対向直進車の死角から出てきた二輪車と自転車の数を示しており、二輪車 32 件、自転車 2 件であった。対向直進車の状況 5 及び 6 は、交差点を右折した先にある横断歩道を直進する自転車とのヒヤリハットである。対向直進車側から直進してきた自転車が 235 件、自車側から直進してきた自転車が 336 件であった。対向直進車の状況 7 及び 8 は、対向直進車の状況 5 及び 6 と同じ状況で、対象が歩行者の場合である。対向直進車側から直進してきた歩行者が 361 件、自車側から直進してきた歩行者が 282 件であった。

次に、レベル別においてヒヤリハットに違いがあるのかどうかを見ていく。

全体では「対向直進車が自動車」の場合が 7 割以上を占めている。交通事故統計データと交通事故例調査データを用いた四輪車同士の死傷事故件数においても、右折対直進の死傷事故件数は上位を占めており、これらの結果とも整合的である³。レベル別で見ると低レベルでは 80.8 % と件数が多い。中レベル (54.3 %)、高レベル (39.0 %) では、右折先横断歩道を横断する自転車や歩行者とのヒヤリハットの割合が増加している。

対向車の状況		高レベル	中レベル	低レベル	合計
1	自動車	60	891	3,667	4,618
2	二輪車	22	111	336	469
3	死角からの二輪車	7	13	12	32
4	死角からの自転車	1	1	0	2
5	右折先横断歩道の自転車(対向車側から直進)	16	133	86	235
6	右折先横断歩道の自転車(自車側から直進)	19	193	124	336
7	右折先横断歩道の歩行者(対向車側から直進)	19	166	176	361
8	右折先横断歩道の歩行者(自車側から直進)	10	134	138	282
合計		154	1,642	4,539	6,335

表 2.1 対向直進車の状況別ヒヤリハット件数

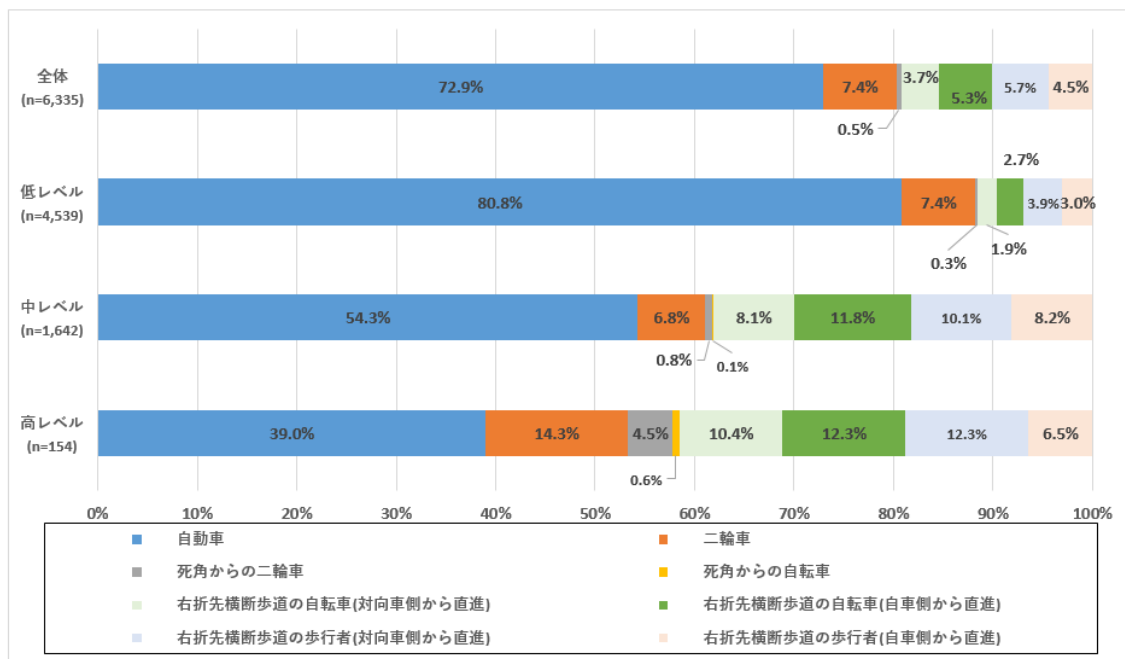


図 2.5 ヒヤリハットレベル別対向直進車の状況

2.4 距離計測による高リスク場面の抽出

次に、表 2.1 に示した対向直進車が「自動車」の場合の計 4,618 件から任意抽出した 79 件について距離計測を行った。距離計測を行う上での条件を以下に示す。

【DR Manager での検索設定】

1. 発生年月日： 2005/1/25~2020/11/22
2. 対象種別：自動車
3. 事故キーワード：右直
4. 地域：東京，札幌，秋田，静岡，福岡
5. ヒヤリハットレベル：高レベル，中レベル，低レベル

【その他の条件】

- 本研究では、ヒヤリハット発生地点の手前でブレーキを踏んだ瞬間を「対向直進車発見地点」としているため、「自車が停止状態から発進直後にヒヤリハットが生じるデータ」、「減速するために断続的にブレーキを踏んでいるデータ」について除外した。
- 距離測定を行う上で、「かなり前からブレーキをかけていて対向直進車との距離が遠いデータ」、「対向直進車発見地点において、対向直進車の前方に先行車がいるデータ」などのように距離測定が困難なものについて除外した。
- 距離測定を行う上で、夜間の場合、また激しい雨や雪が降っており映像からの判断が難しいものについて除外した。

上記の条件に当てはまる 79 件の内訳は、高レベル 19 件、中レベル 59 件、低レベル 1 件計 79 件である。これらのデータについて、自車が対向直進車に気づいてブレーキを踏んだ瞬間(対向直進車発見地点)での自車と対向直進車の相対距離と自車の速度について計測した。「対向直進車発見地点」は、ヒヤリハット発生地点の手前で対向直進車が出現した際に運転者がブレーキ操作をした瞬間と定義し、その地点における自車の車両先端から対向直進車の車両右先端までの相対距離を測定した。

計測には DR manager 2 に搭載されている任意の座標とカメラ間の距離を測定する「DR manager 距離測定ツール」を用いた(図 2.6)。

また、抽出したデータに関して、以下の数値を記録した。

- ・ A_X[m]：前方距離計測結果(車両先端からの距離)
- ・ A_Y[m]：左右距離計測結果
- ・ Speed(km/h)：ブレーキを踏んだ瞬間の車速



図 2.6 DR manager 距離測定ツール

2.5 潜在リスクレベルの定量化

本節では抽出したヒヤリハットデータの各イベントから、右折時の対向直進車に対する衝突危険度を物理的な意味を持つ客観的指標の算出方法について述べる。本調査研究では、ヒヤリハット映像の画像処理を施して得られた対向直進車との相対距離（ターゲットの対向直進車両出現時）と、そのときの自車の速度から、理論的に制動距離を算出することとする。

自動車の制動距離は以下の式によって計算できる。

$$D_{brake} = \frac{V^2}{2a} \quad (2.1)$$

ただし、 D_{brake} は制動距離、 V は自車速度、 a は減速度である。ここでは乾燥路面での強いブレーキを想定し、 $a = 4\text{m/s}^2$ とする。

ここでは、式(2.1)の距離を基準に、対向直進車が出現した際に運転者がブレーキ操作した瞬間の相対距離（自車と対向直進車間距離）との比率を潜在リスクレベルとする。基準となる制動距離に対して現在取っている相対距離の比率が小さければ危険度（リスク）が高く、逆に基準に対する相対距離の比率が大きければ、余裕があるので危険度（リスク）が低いと解釈できる。すなわち、リスクレベル(Risk Level :RL)は以下の式で表現できる。

$$RL = \frac{D_{brake}}{D} = \frac{V^2}{2aD} \quad (2.2)$$

ただし、 D は実際の相対距離である。

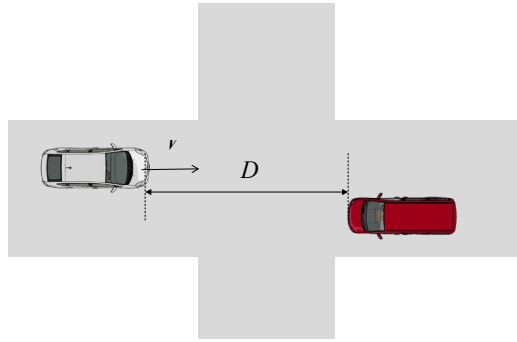


図 2.7 潜在リスクレベルに関する変数

また、式(2.2)から、自車速度と相対距離との関係を以下の式で表すことができる。

$$V^2 = (2 \cdot a \cdot RL) \cdot D \quad (2.3)$$

この方程式から、リスクレベル RL の大きさから、自車速度の安全性を物理法則から客観的に評価できることがわかった。また、この考え方を使えば、ヒヤリハットデータベースから抽出した右折場面のシーンの危険度（リスク）を評価することができる(図 2.8)。

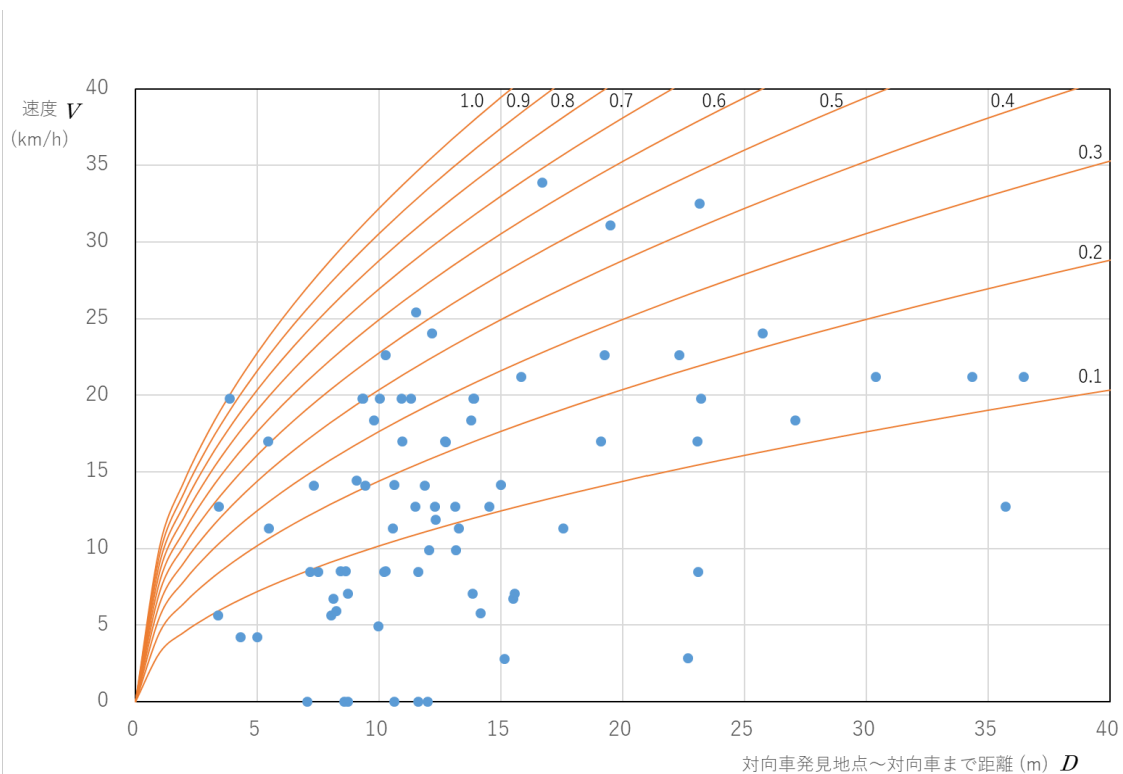


図 2.8 右折時の対向直進車発見地点における潜在リスクレベルの分布 (N = 79)
線：潜在リスクレベルの等高線（値は数字で表記）

2.6 高リスク場面に関するアノテーションの設定

図 2.8 に示したリスクレベルの分布に基づき，潜在リスクレベルが 0.4 以上の 10 件についてアノテーションを設定した（表 2.2）．地図情報に設定可能である静的周辺環境情報と，交通量や先行車などの他者の行動によって変化する動的走行環境情報，天気や時間などの地図情報以外に設定可能であるその他の周辺環境情報に分けた．

表 2.2 アノテーション定義

道路環境文脈	項目	定義		
静的周辺環境 情報	地域	住宅街	ビジネス街 (繁華街を含む)	その他 (郊外など)
	交差点信号	無		有
	車線数	1車線		2車線以上
	右折レーン	無		有
	交差点の形状	T字路	4差路	その他
動的周辺環境 情報	歩行者	0～2 (少ない)	3～9 (普通)	10～ (多い)
	交通量	0～2 (少ない)	3～9 (普通)	10～ (多い)
	駐車車両	0～2 (少ない)	3～5 (普通)	6～ (多い)
	先行車	無		有
その他	天候	晴 or 曇		雨 or 雪
	時間	日中		夜 (ヘッドライト点灯)

アノテーションを設定した潜在リスクレベル 0.4 以上の 10 件の集計結果を表 2.3 に示す．また，図 2.9 は，集計した 10 件の詳細である．距離計測の抽出条件として，映像からの判断が困難な夜間や激しい雨などの場合を除いているため，アノテーションを設定した 10 件は昼間のケースであり夜間のケースは無い．また，天候も晴天又は曇天が 9 件，小雨が 1 件であり，乾燥路面でのケースが大半を占めている．

静的周辺環境情報については、地域は住宅街 4 件とビジネス街 6 件であった。また、交差点信号は 9 件が信号のある交差点であった。車線数は 2 車線以上が 6 件、右折レーンのある場合が 6 件、交差点の形状は 4 差路交差点が 7 件であった。動的周辺環境情報については、歩行者、交通量とも 10 人(台)以上の混雑した環境は 1 件のみで、残りは 0~9 人(台)の場合で、交通量の多いケースは少なかった。駐車車両はどのケースでも見当たらなかった。しかし、先行車がいる場合が 7 件と多いことが特徴的であった。

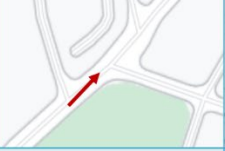
表 2.3 アノテーション別集計結果

静的周辺環境情報	項目	計
地域	住宅街	4
	ビジネス街	6
	その他	0
交差点信号	無	1
	有	9
車線数	1車線	4
	2車線以上	6
右折レーン	無	4
	有	6
交差点の形状	T字路	1
	4差路	7
	その他	2

動的周辺環境情報	項目	計
歩行者	少ない	5
	普通	4
	多い	1
交通量	少ない	2
	普通	7
	多い	1
駐車車両	少ない	10
	普通	0
	多い	0
先行車	無	3
	有	7

その他	項目	計
天候	晴 or 曇	9
	雨 or 雪	1
時間	日中	10
	夜	0

ID	950489	824366	911533	908536
ヒヤリハット画像				
平面図 (Google Map)				
地域	ビジネス街	住宅街	ビジネス街	ビジネス街
交差点信号	有	有	有	有
車線数	片側2車線	片側1車線	片側3車線	片側4車線
右折レーン	有	無	有	有
交差点の形状	4差路	5差路	5差路	4差路
歩行者	多	少	少	普通
交通量	普通	普通	普通	普通
駐車車両	少	少	少	少
先行車	有	有	無	無
天候	雨	晴	晴	晴

ID	348385	766474	653190	817356
ヒヤリハット画像				
平面図 (Google Map)				
地域	住宅街	住宅街	住宅街	ビジネス街
交差点信号	有	有	無	有
車線数	片側2車線	片側2車線	片側1車線	片側1車線
右折レーン	有	有	無	無
交差点の形状	4差路	4差路	T字路	4差路
歩行者	普通	少	少	普通
交通量	普通	普通	少	多
駐車車両	少	少	少	少
先行車	有	有	有	有
天候	晴	曇	晴	晴

ID	950370	816537
ヒヤリハット画像		
平面図 (Google Map)		
地域	住宅街	住宅街
交差点信号	有	有
車線数	片側2車線	片側1車線
右折レーン	有	無
交差点の形状	4差路	4差路
歩行者	普通	少
交通量	普通	少
駐車車両	少	少
先行車	有	無
天候	曇	曇

図 2.9 危険度(リスク)が高いケースの詳細

2.7 まとめ

本章では、東京農工大学スマートモビリティ研究拠点で収集したドライブレコーダの走行データを用いて、交差点の右折場面における急ブレーキポイントについて分析し、収集したデータから高リスク場면을抽出し、その特徴について分析を行った。

これらの結果から、交差点での右折場面において潜在リスクレベルの高い場面の特徴として、対向直進車発見地点での先行車の存在が示唆された。しかし、今回の結果はデータ数が少なく、さらなるデータの解析が必要であるため、今後の課題としたい。

参考文献

- [1] <https://web.tuat.ac.jp/~smrc/drcenter.html> (2022/02/10 アクセス)
- [2] 交通事故総合分析センター，信号交差点における右折事故，イタルダ・インフォメーション No. 95, 2012. <https://www.itarda.or.jp/contents/8941/info95.pdf> (2022/03/14 アクセス).
- [3] 交通事故総合分析センター，四輪車同士の右折対直進の事故，イタルダ・インフォメーション No. 136, 2020 . <https://www.itarda.or.jp/contents/8941/info136.pdf> (2022/03/14 アクセス).

第3章

衝突速度計算による交差点右折時のリスク評価と減速支援効果の検証

3.1 はじめに

自動運転や高度運転支援システムを用いて安全かつ快適に市街地を運転するためには適切に危険予測を行い、衝突だけではなく緊急回避動作を避けるためのリスク予測運転が必要不可欠である。

本章では、衝突速度を衝突リスク指標とし、衝突速度を計算する手法について述べる。また、実際のヒヤリハット場面での計測データをシミュレーション上で再現し、衝突速度計算手法を実際の場面で適用した結果について述べる。さらに、衝突速度を減少させることができる弱いブレーキ介入による運転支援をシミュレーション上で行い、運転支援による衝突リスクの早い段階での減少効果について評価する。

3.2 衝突速度計算理論

運動エネルギーは物体の運動速度の二乗に比例するため、複数の物体が衝突する際の相対速度は衝突時のダメージに大きな影響を与える。そのため、本研究では二物体間の衝突時の相対速度の絶対値を衝突リスクとして、この衝突速度を事前に計算することでリスク予測を行う。本節では衝突速度の計算手法について示す。本研究では自車両と対象車両の二物体のみが衝突する場合として、二物体はどちらも剛体であり、衝突時の物体の回転は考えないものとする。

自車両および対象車両の現在の速度を v_{ego} , v_{obj} とする。自車両と対象車両の予測軌道が得られるものとして、現在の位置から等速で物体が移動すると仮定し、二物体が同時に同じ位置に存在する場合に衝突速度を計算する。図 3.1 に示すように車両の向きを予測軌道の接線方向とし、衝突速度 v_{col} を以下の式で計算する。

$$v_{col} = \sqrt{(v_{ego,p} \cos(\varphi_{col}) + v_{obj,p})^2 + v_{ego,p}^2 \sin^2(\varphi_{col})} \quad (3.1)$$

ただし、衝突時の速度 v_{ego_cp} および v_{obj_cp} は等速運動を仮定するため、 $v_{ego_cp} = v_{ego}$, $v_{obj_cp} = v_{obj}$ である。また、 φ_{col} は自車両と対象車両の予測衝突時の相対角度を示す。

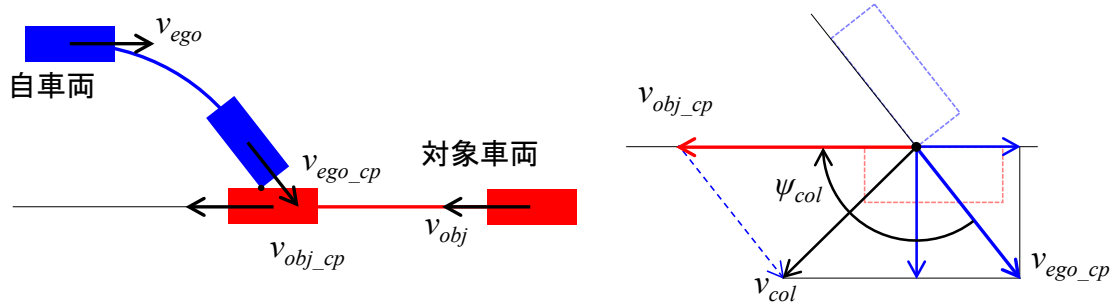


図 3.1 衝突速度の定義

3.3 衝突速度計算用データの準備

実際の場面での衝突速度計算を行うためにヒヤリハットデータベースの計測データを用いて検証を行った。ヒヤリハットデータベースに記録された位置情報、加速度情報、映像データを用いてヒヤリハットデータベースでの場面をシミュレーション上で再現し、衝突速度の計算を行う。

データベースに記録された位置情報より Google Earth®の鳥瞰画像データを比較し、データベースの映像データを参考に、鳥瞰画像上に自車両および対象車両の走行軌道をプロットする。プロットした点を図 3.2 に示すように 3 次スプライン曲線を用いてデータを内挿し、曲線を生成することで、自車両および対象車両のヒヤリハットデータベース上の動きを再現した。また、自車両の速度は計測された加速度情報を積分することで取得した。対象車両の速度は映像データから 2 点間を移動した距離と時間から推定し、一定速度で移動しているものとした。

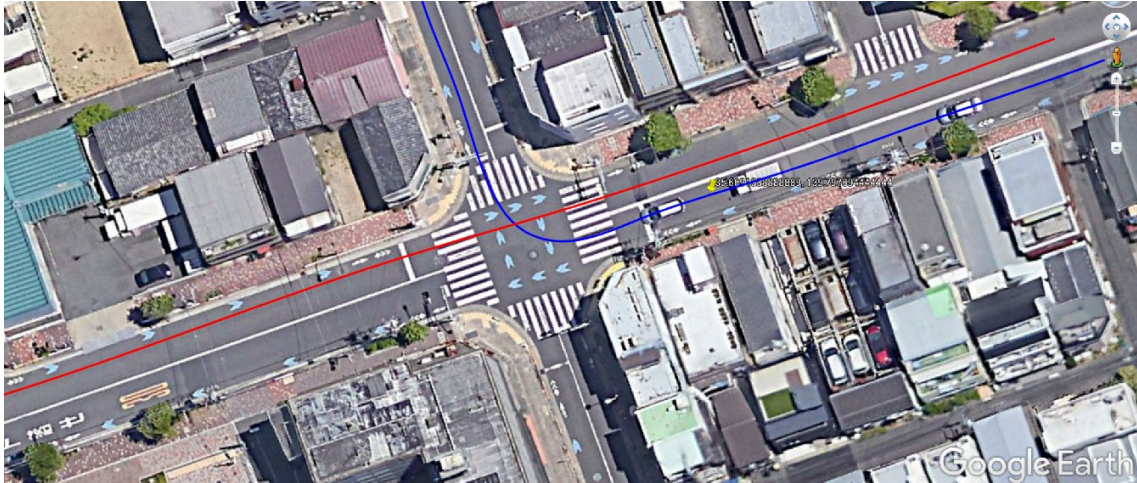


図 3.2 スプライン曲線で内挿した自車両の軌跡(青色)および対象車両の軌跡(赤色)

本研究では IPG CarMaker® (CarMaker)を用いてヒヤリハット場面の再現を行った。CarMaker では、自車両の加減速はデータベースの加速度情報から得られた速度を追従させることで再現した。自車両の操舵は再現した軌道を追従するように、図 3.3 に示す前方注視点モデル

を用いて再現した．自車両の舵角 δ_f は以下の式で求められる．

$$\delta_f = K_p \kappa = \frac{2K_p y_p}{x_p^2 + y_p^2} \quad (3.2)$$

ただし， K_p はゲイン， κ は曲率， (x_p, y_p) は自車両を始点とした円弧と目標経路が円弧長 $v_{ego} t_p$ で交わるときの目標経路上の円弧の終点の位置である．

また，対象車両の位置はデータベースから再現した軌跡と速度から位置を直接入力し，角度は軌道の接線方向とした．

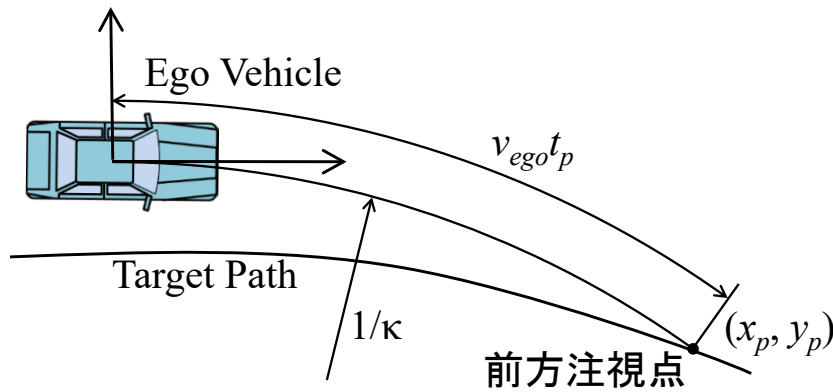


図 3.3 前方注視点モデル

本研究で衝突予測に用いる予測軌道は簡単のため，自車両はヒヤリハットデータベースから再現した軌道を用いた．つまり本研究では自車両の予測軌道と実際に通る経路は同様とした．対象車両の予測軌道については現在の位置から車両の前方方向へ直進する軌道を用いた．本研究では 0.1Hz で衝突予測を繰り返し行い，現在の速度で運動した際に衝突する場合の衝突速度を計算する．

3.4 ヒヤリハットデータベースのヒヤリハット事例を用いた衝突速度予測

ヒヤリハットデータベースにおける交差点右折時の直進対向車両との衝突リスクが高かったケースを対象に衝突速度を計測した．今回対象とするヒヤリハット場面は第 2 章で抽出した 10 場面の中で，操舵回避を行わず，対向車両の軌道を推定可能であった 3 場面とし，それぞれを Case I (ID: 824366)，Case II (ID: 950370)，Case III (ID: 816537) とした．それぞれのケースのヒヤリハットデータベースの映像と再現したシミュレーションの結果を図 3.4, 図 3.6, 図 3.8 に示した．

また，シミュレーションで用いた自車両および対象車両の速度および加速度，計算された衝突速度，衝突までの時間(TTC: Time to collision)を図 3.5, 図 3.7, 図 3.9 を示す．ただし，TTC は現在の自車両から，自車両と対象車両の軌道の交点まで直線距離を自車両の速度で除したものとした．

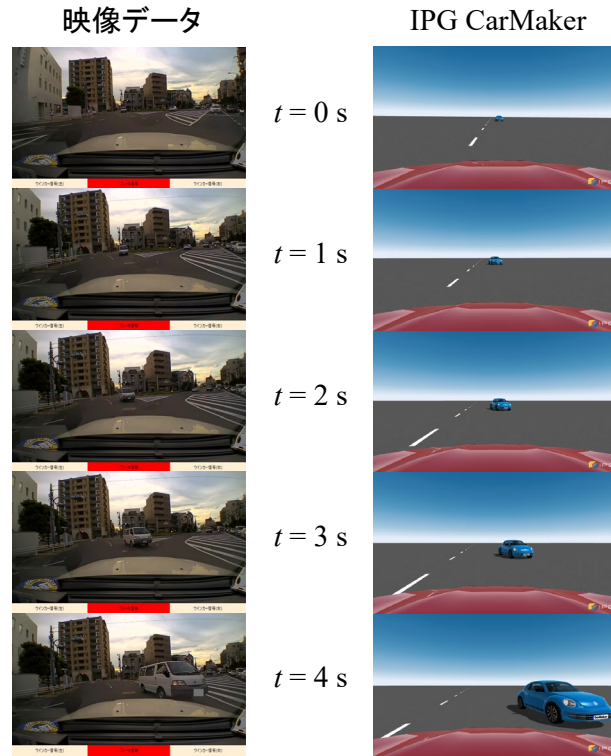


図 3.4 Case I (ID: 824366): ヒヤリハットデータベースと再現したヒヤリハット場面

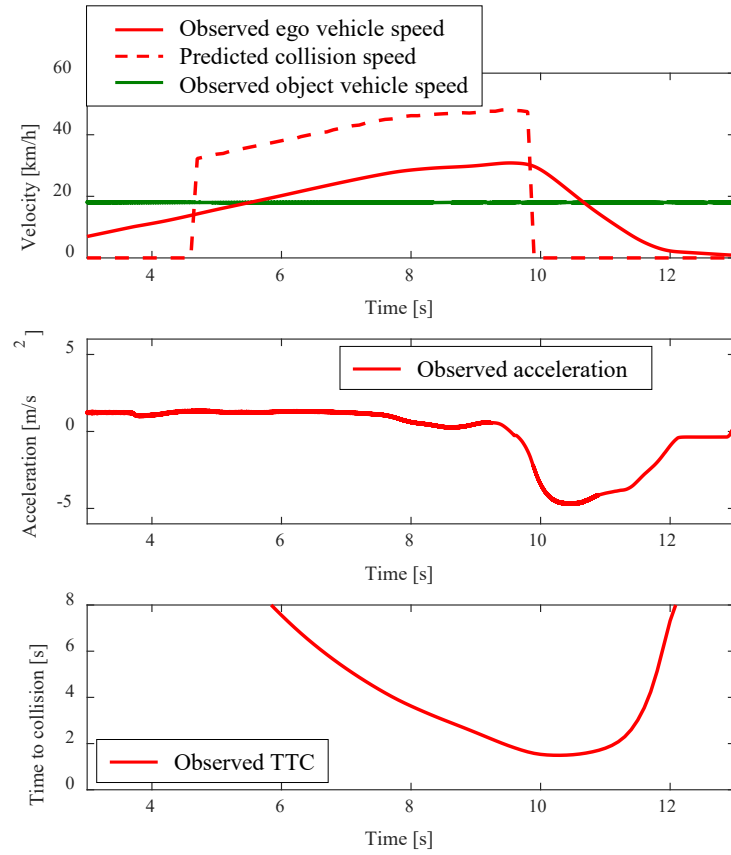


図 3.5 Case I (ID: 824366): 再現したヒヤリハット場面のシミュレーション結果

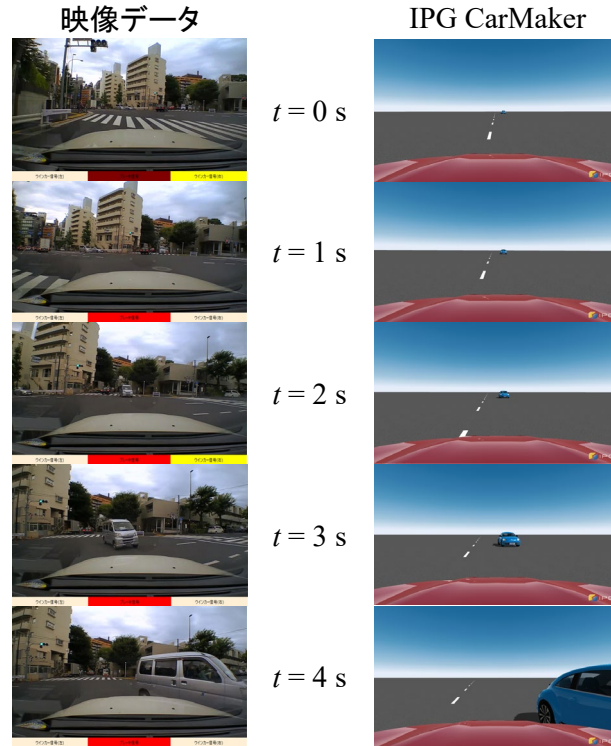


図 3.6 Case II (ID: 950370): ヒヤリハットデータベースと再現したヒヤリハット場面

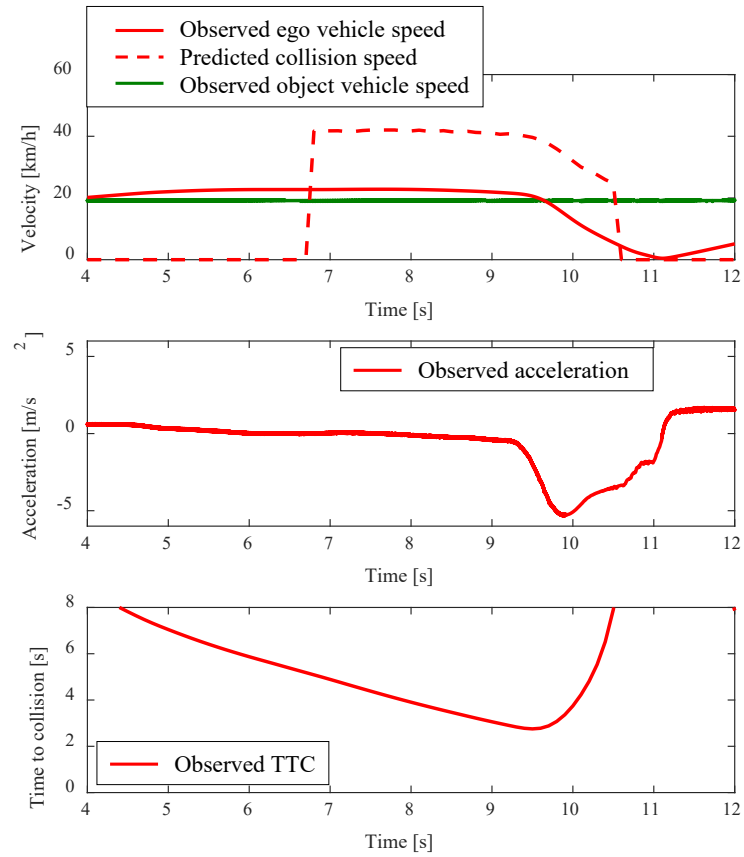


図 3.7 Case II (ID: 950370): 再現したヒヤリハット場面のシミュレーション結果

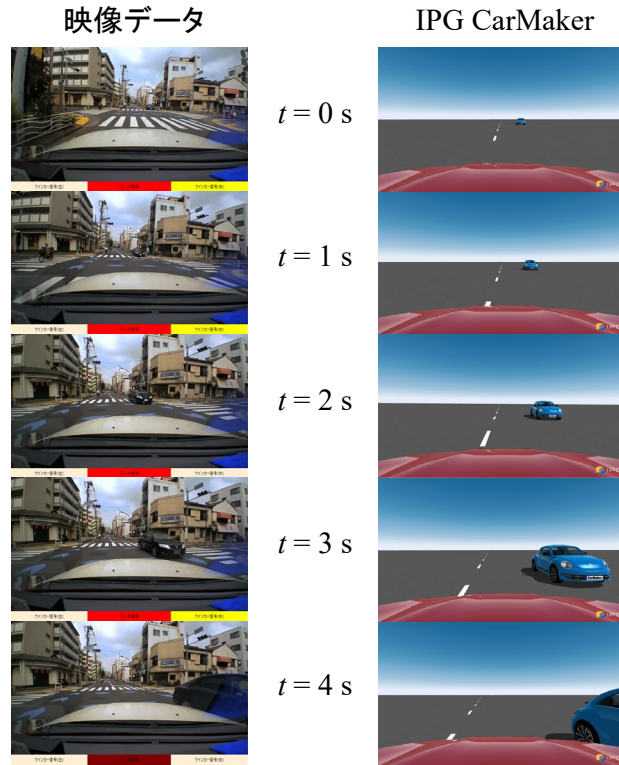


図 3.8 Case III (ID: 816537): ヒヤリハットデータベースと再現したヒヤリハット場面

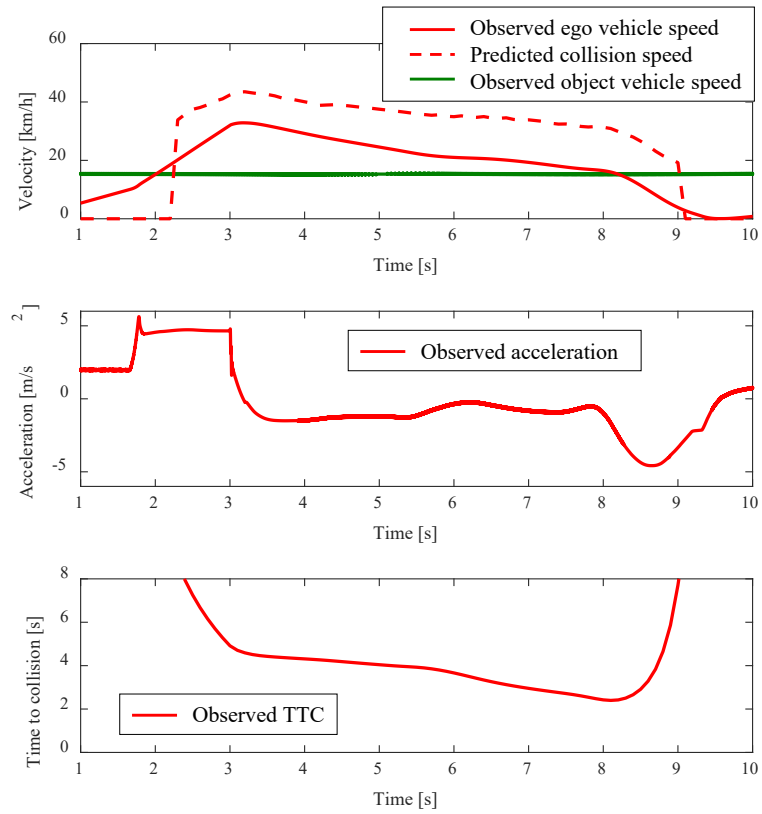


図 3.9 Case III (ID: 816537): 再現したヒヤリハット場面のシミュレーション結果

いずれのケースにおいてもドライバの急ブレーキにより衝突が回避されたが、緊急回避時の最大減速度は 4 m/s^2 を上回っており、衝突へのひっ迫度が高かったことがわかる。

特に Case I, Case II においては、ドライバが緊急回避動作を行う直前まで予測衝突速度が 40 km/h 程度であり、衝突時のリスクの高い場面であると考えられる。

3.5 減速支援効果の検証

衝突リスクを減少させる手法としてブレーキによる減速支援を採用した。本研究では衝突速度が予測された時点から一定の減速度で減速支援を行い、急ブレーキによる緊急回避を行わずに衝突回避を行う。このような支援を行うことで、衝突速度の減少をさせることができ、また、適切な減速度で減速することで、対象車両と十分な余裕をもって衝突回避をすることが可能となる。また、この運転支援を弱いブレーキ支援で実現することで、自動運転や高度運転支援システムにおいてスムーズかつ安全な交差点右折を実現することができる。本研究で用いる運転支援システムによる衝突速度の減少の概念図を図 3.10 に示した。

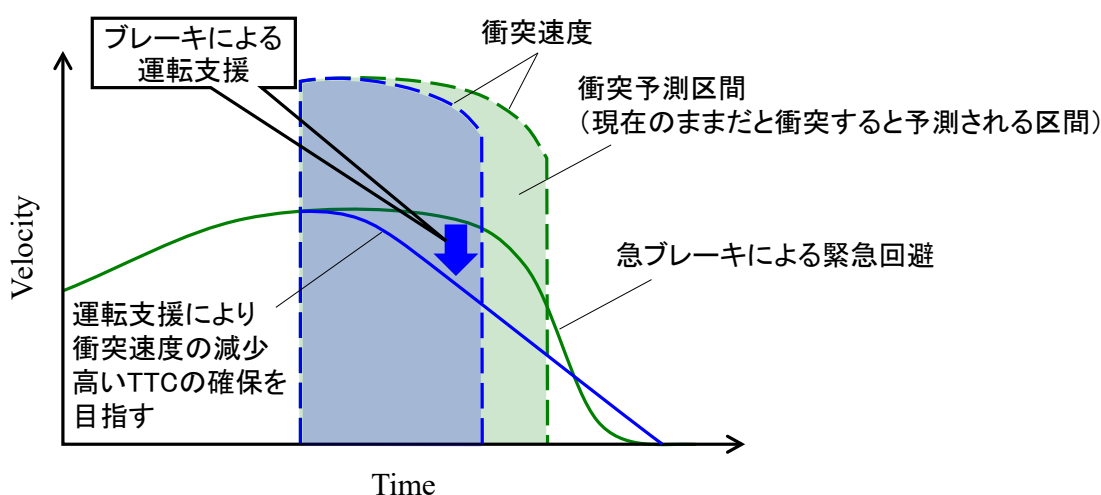


図 3.10 衝突速度の減少を行う運転支援システムの概念図

減速支援制御による減速度は以下の通りに決定される。衝突速度が予測された時点で自車両の目標減速度を 0.5 m/s^2 から 0.1 m/s^2 ずつ減少させて衝突速度を予測し、TTC が 3 秒以上となるまで目標減速度を探索する。本研究では弱いブレーキ支援による運転支援としているため、減速支援による最大の減速度を 2.5 m/s^2 とし、適切な減速度を決定できない場合は目標減速度を 2.5 m/s^2 とする。

ただし、減速支援はシステムの作動遅れを考慮し、図 3.11 に示すように衝突速度が初めて予測された時点から 0.3 秒後に開始され、現在の減速度から目標減速度までは -5.0 m/s^3 の加加速度で減速度が遷移するものとした。また本研究では減速支援の目標減速度は衝突速度が予測された時点でのみ計算され、支援開始後に自車両が停止するまで一定の減速度で減速を行った。加えて、

本シミュレーションでは運転支援システムは目標値を完全に追従して自車両を制御できるものとした。

3.3 節のヒヤリハットデータベースから再現した 3 場面を対象に減速支援制御を行い減速支援による衝突速度の減少効果を検証した。図 3.12, 図 3.13, 図 3.14 にそれぞれのシミュレーション結果を示した。

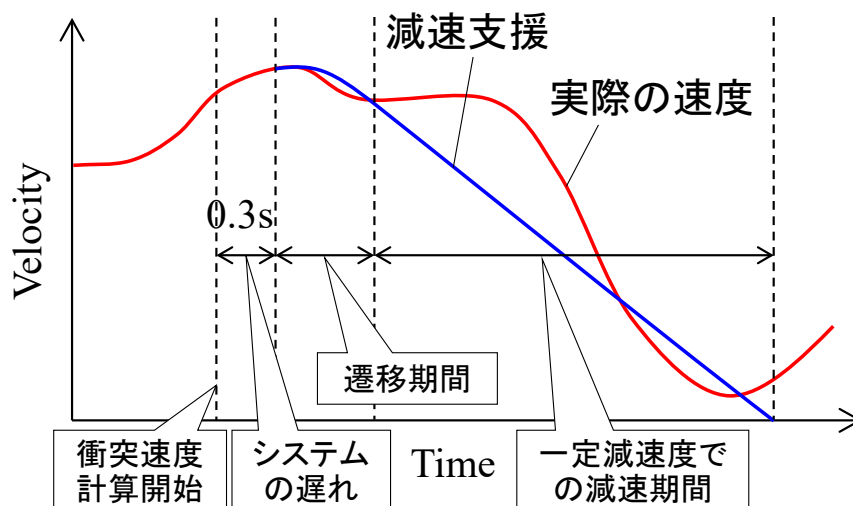


図 3.11 減速支援システムの概要

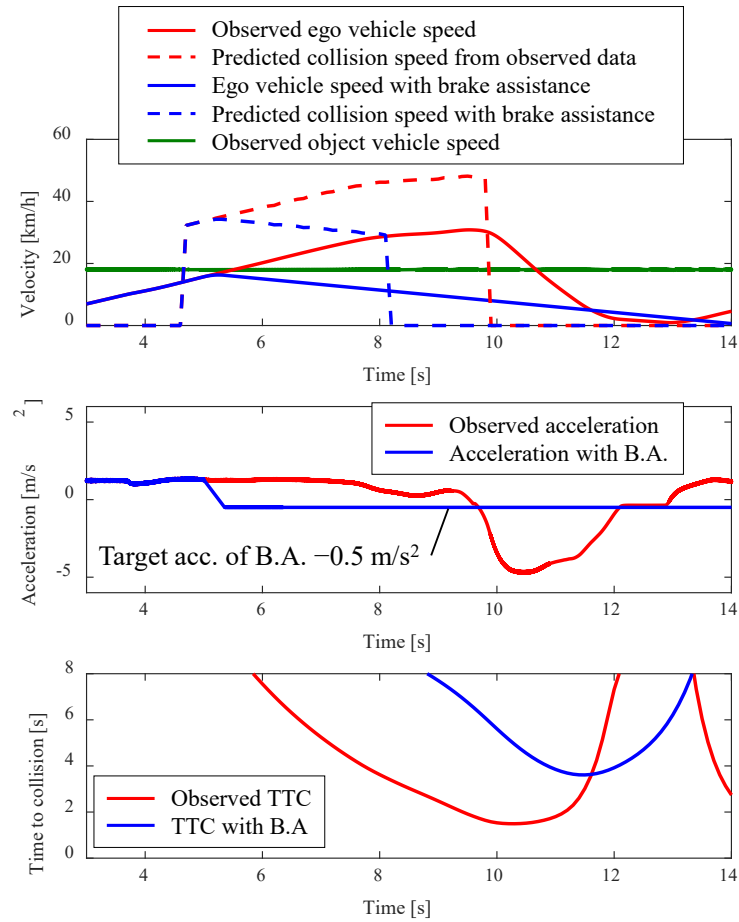


図 3.12 Case I (ID: 824366): シミュレーションにおける減速支援(B.A.)による支援効果と衝突速度計算結果

Case I ではドライバーによる対象車両の発見が遅れたため、急ブレーキで回避を行ったが、本研究で提案する衝突速度予測手法では TTC が 8 秒以上の時点で衝突が予測されたため、その時点で運転支援を開始した。早い時点で運転支援を開始したため、目標減速度を -0.5 m/s^2 として運転支援をすることで、衝突速度の減少、高い TTC の確保を実現した。

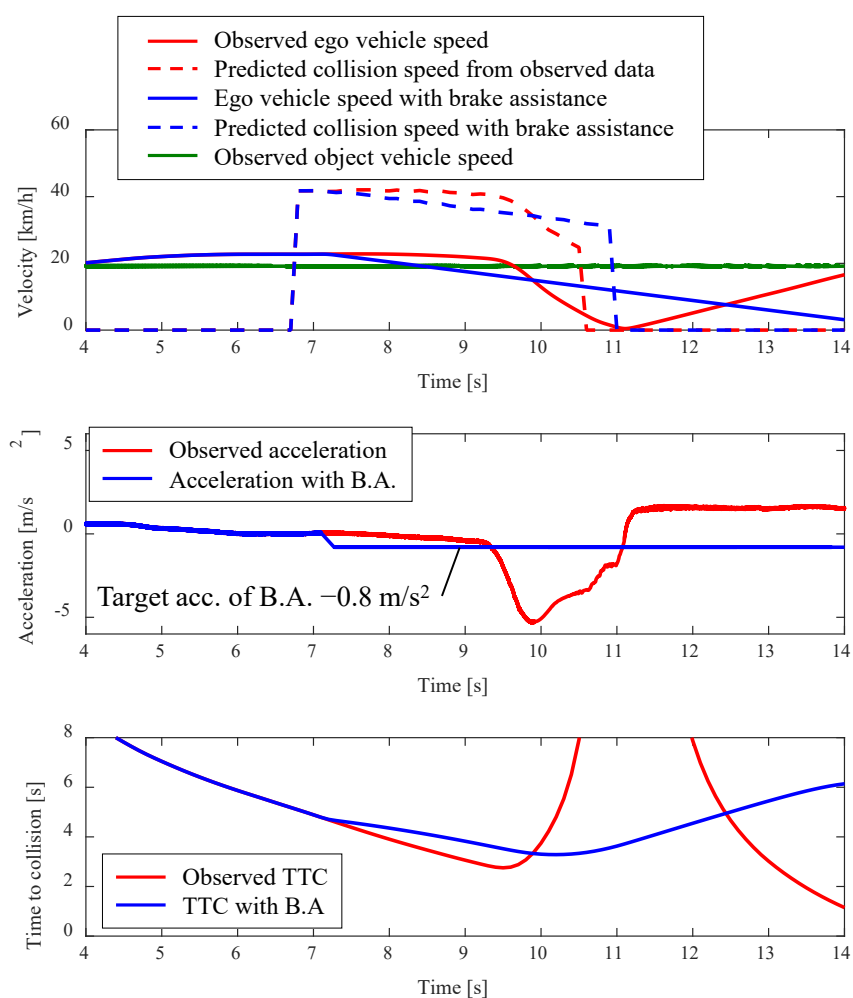


図 3.13 Case II (ID: 950370): シミュレーションにおける減速支援(B.A.)による支援効果と衝突速度計算結果

Case II では、衝突速度が予測された時点で TTC が 4 秒以上あり、十分な余裕をもって運転支援を開始した。目標減速度を -0.8 m/s^2 であり、弱いブレーキ介入で安全に余裕をもって衝突回避を行うことができた。

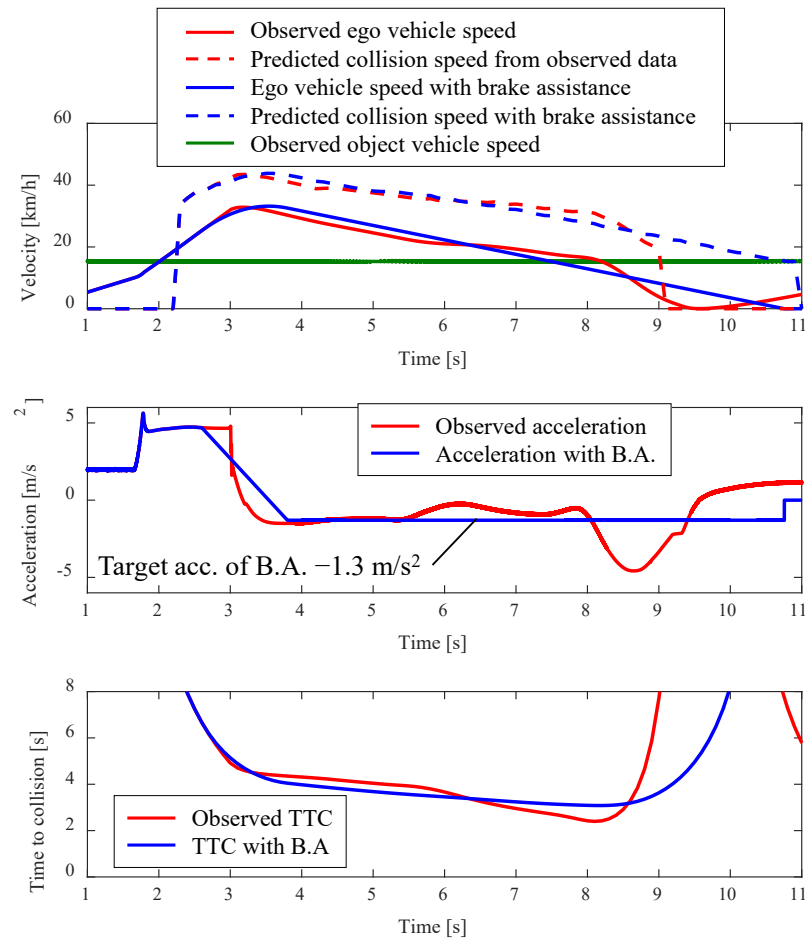


図 3.14 Case III (ID: 816537): シミュレーションにおける減速支援(B.A.)による支援効果と衝突速度計算結果

Case III では、ドライバが適切に減速を行っていたため、運転支援システムの有無にかかわらず大きな差が出ていないが、6 秒付近からドライバが減速を十分に行っていないため、緊急回避を行った。一方で、弱いブレーキによる減速支援を行うことでドライバの不十分な減速を補うことができおり、緊急回避をなしに、十分な TTC を確保して衝突回避を行うことができた。

3.6 結論

本章では衝突速度をリスクとして現在の自車両および対象車両の速度，位置，角度から衝突速度を計算する手法を用いて，実際のヒヤリハットのケースをシミュレーション上で再現することで衝突速度計算手法により実際のヒヤリハットケースのリスクを推定した．また，危険度の高い場面に対し弱いブレーキ支援を行う運転支援システムを導入することで，急ブレーキを行わずに交差点での安全な通行を実現した．早い段階での減速支援を行うことで予測される衝突速度の減少と高い TTC の確保が可能となった．

第4章 結論

本調査研究は、右折時の安全性向上に寄与する研究開発に関するものである。まず、リスクマップ構築に向けて、道路環境の顕在・潜在リスクを合理的に予測するモデルの構築を行う。本研究では、一般道の交差点等における右折場面に着目し、ドライブレコーダによって取得した実際の交差点を運転した際の運転行動データおよび周辺の道路環境情報から、実路データに基づき、リスクの高い右折場面の特徴を分析する。次に、右折時の安全走行速度演算モデルを定式化し、安全運転のためのブレーキ支援制御システム(リスクレジリエンスコントロール)を開発することを研究の目的とする。

本研究の第一部では、道路空間内のリスクマップ構築に向けた文脈情報の整理およびデータの基礎的分析を行った。タクシー車両に取り付けられたドライブレコーダから得られた右折ヒヤリハットデータを抽出し、走行空間内の静的な環境文脈パラメータ(道路形状、車線数、歩道、標識等)および動的な交通外乱(交通参加者の飛び出し速度および相対距離等)に対して、走行環境リスクを客観的に評価する指標を使って、右折時に注意すべき点について分析した。

第二部では、右折時の衝突リスクを算出する方法として、物理的な意味を持つ「衝突速度の推定値」を算出し、衝突速度が低くなるように「適正な安全速度」を算出する手法を提案する。コンピュータシミュレーションを使って、危険場面を再現し、速度超過分を抑制する減速支援システム(リスクレジリエンスコントロール Risk Resilience Control: リスク回復制御)を設計し、そのシステムの安全性向上に対する有効性を検証した。具体的には、衝突速度をリスクとして現在の自車両および対象車両の速度、位置、角度の情報から衝突速度を理論的に推定し、実際のヒヤリハットのケースをシミュレーション上で再現することで衝突速度計算手法により実際のヒヤリハットケースのリスクを推定した。また、危険度の高い場面に対し緩ブレーキ支援を行うシステムを導入することで、急ブレーキを行わずに交差点での安全な通行を示した。早い段階での減速支援を行うことで予測される衝突速度の減少と高い衝突余裕時間の確保が可能になったと確認できた。

今後は、解析データ数を増やし道路環境の顕在・潜在リスク推定モデルの精度向上を行い、リアルタイムに交差点の潜在リスクを予測し、危険を運転者に事前に知らせるために地図上に表示するリスクマップ構築を開発する。さらに、ドライビングシミュレータおよび実験車両を用い、本調査研究で提案したリスクレジリエンスコントロールの有効性を検証していく予定。