

NAIST-IS-DD0661006

博士論文

無信号交差点非優先側ドライバ通過行動モデルの構築と
出会い頭事故発生シミュレーション

小坂田 泰宏

2009年2月5日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報システム学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
博士(工学) 授与の要件として提出した博士論文である。

小坂田 泰宏

審査委員：

西谷 紘一 教授 (主指導教員)

松本 健一 教授 (副指導教員)

野田 賢 准教授 (副指導教員)

無信号交差点非優先側ドライバ通過行動モデルの構築と 出会い頭事故発生シミュレーション*

小坂田 泰宏

内容梗概

近年, 交通事故件数および交通事故死者数ともに減少傾向にあるが, 依然として高いレベルにあり, 交通事故に対する対策が求められている. 交通事故の中でも, 出会い頭事故は, 追突事故に次いで2番目に多く発生しており, 死亡事故などの重大な事例に繋がるケースが多く, 有効な対策が求められている. また, 出会い頭事故の約80%を占める無信号交差点での事故原因の多くはヒューマンエラーであると言われている. 本研究では, 無信号交差点での出会い頭事故に焦点を当てて, ヒューマンエラーや人間の機能の劣化が事故発生に及ぼす影響を定量的に評価するコンピュータシミュレーションについて考察する.

ヒューマンエラーと出会い頭事故発生の関係を分析するためには人間の認知情報処理のモデル化が必要となる. まず, 日常的に模範的な運転を行っているドライバの無信号交差点における非優先側交差点通過行動をタスクフローとして記述した研究結果を参考として, 非優先側ドライバの交差点通過行動をコンピュータシミュレーションで再現するためのドライバモデルを作成した. 続いて, 開発したドライバモデルをいろいろな交通条件下でシミュレーションするため, 交差点通過行動を再現する交通シミュレーションシステムを開発した. これによって, 例えば, 交差点進入直前に十分な安全確認を行わないドライバが交差点に接近する交差車両を見落として, 衝突に至るまでのプロセスを時系列で追跡することが可能になっ

* 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻 博士論文, NAIST-IS-DD0661006, 2009年2月5日.

た. また, このドライバが事故を起こす交通条件を明らかにすることもできるようになった.

次に, 過去の出会い頭事故の分析から見つけれられた典型的な数個のヒューマンエラーをドライバモデルに組み込んだ. そのモデルを用いていろいろな条件下で交差点通過シミュレーションを繰り返すことによって, 各ヒューマンエラーが出会い頭事故およびヒヤリハットに至る割合を調べることができる. その結果, 交差点や一時停止標識を見落とすヒューマンエラーは他のヒューマンエラーに比べて出会い頭事故およびヒヤリハットに至る割合が高いことが確認できた. 最後に, 構築した交通シミュレーションシステムを用いて, 出会い頭事故対策として, 一時停止線手前でドライバに警報を出すアラームシステムの効果を評価した. 特にドライバの心身状態が低下してアラームシステムへの反応遅れがあることを考慮したとき, 一時停止線で停止することを気づかせるアラームが必要であることが確認できた.

本研究で提案した交通シミュレーションシステムを使うことによって, ドライバの認知情報処理プロセスで起こるいろいろなエラーや機能劣化が事故やヒヤリハットの発生件数に及ぼす影響が評価できるとともに, いろいろな事故対策がドライバの行動をどのように変え, 事故やヒヤリハットの発生防止にどの程度効くのかを評価することができる.

キーワード

非優先側ドライバ, 交差点通過行動, シミュレーション, 認知情報処理プロセス

Development of a Program Simulating Behavior of a Driver without Right of Way When Crossing a Non-signalized Intersection*

Yasuhiro Osakada

Abstract

Although traffic accidents and deaths in accidents have been decreasing in recent years, they still remain at high levels. The number of crossing collisions is the second largest among traffic accidents and the number of deaths in crossing collisions is quite large. Thus, it is necessary to take measures for preventing crossing collisions. It is said that 80 percent of crossing collisions occur at non-signalized intersections and most of them are caused by human error. In this research, by focusing on crossing collisions at non-signalized intersections, a computer simulation method that assesses the influence of human error and lack of human faculties is discussed and programmed.

To analyze the relations between human error and occurrence of crossing collisions, it is necessary to make a model of the cognitive information processing of human beings. At first, a model representing the crossing behaviors of a driver without the right of way is constructed from the task flow of crossing behaviors of an exemplary driver proposed in previous research. Next, for simulating driver behavior under various traffic circumstances, a micro traffic simulator that can represent the crossing behaviors of the driver is developed. By using this simulator, it is possible to observe how a driver who doesn't confirm safe conditions

* Doctoral Dissertation, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-DD0661006, February 5, 2009.

sufficiently before entering an intersection overlooks a crossing car and gets in an accident. It is also possible to clarify the influence of the traffic conditions on the accidents caused by drivers.

Next, several human errors found by the analysis of crossing collisions are incorporated into the driver model. By simulating various traffic circumstances with the use of the model, it is possible to observe the rate of occurrence of crossing collisions and "close calls". In the result, it is confirmed that the human errors of overlooking intersections and stop signs results in the highest percentage of crossing collisions and close calls. Finally, as a preventive measure of crossing collisions, the effectiveness of an alarm system that warns the driver at the stop line is assessed. When the driver's reaction is delayed by decline of the mind-body state, the necessity of an alarm system that notices the existence of the stop line is confirmed.

By using the simulator suggested by this research, it is possible to assess the increasing rate of occurrence of crossing collisions and close calls by human error and lack of human faculties in the cognitive information processing process. It is also possible to assess how measures of preventing collisions can change the actions of drivers and how effective the measures are.

Keywords:

driver without right of way, behavior passing through an intersection, simulation, cognitive information processing process

目次

1. 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 先行研究	4
1.3 研究目的	11
2. 無信号交差点非優先側ドライバ通過行動のモデル化	12
2.1 模範的ドライバの交差点通過行動フロー	12
2.2 交差点環境のモデル化	14
2.3 非優先側ドライバの詳細化モデル	15
2.4 優先側ドライバの詳細化モデル	22
3. 交差点通過行動シミュレーションプログラムの開発	23
3.1 シミュレーションプログラム	23
3.2 通過行動の安全性評価指標	24
3.3 シミュレーション例	24
3.4 種々の条件下でのシミュレーション	31
3.4.1 シミュレーション条件	31
3.4.2 シミュレーション結果	31
3.4.3 事故事例の分析	32
3.5 まとめ	35
4. 典型的な出会い頭事故シミュレーション	36
4.1 事故発生時の非優先側ドライバの交差点進入行動パターン	36
4.2 不安全なドライバの詳細化モデル	37
4.3 出会い頭事故発生シミュレーション	45
4.3.1 シミュレーション条件	45
4.3.2 事故事例分析	47
4.3.3 危険事象発生件数の比較	49
4.3.4 エラーの発生確率の推定	50

4.3.5	危険事象発生条件の可視化	51
4.4	可視化手法のドライバ支援システムへの応用	63
4.4.1	車車間通信を用いたドライバ支援システムの先行研究 . . .	63
4.4.2	提案する支援システムの構成	63
4.4.3	支援アルゴリズム	63
4.5	まとめ	65
5.	アラームシステムの評価	66
5.1	事故防止対策の検討	66
5.2	アラームシステムの構築と安全時間領域	67
5.2.1	アラームシステムの先行研究	67
5.2.2	アラームシステムの構築	71
5.2.3	急ブレーキ操作と安全時間領域	72
5.3	アラームに対する認知の遅れによる影響	77
5.3.1	アラームに反応するドライバの詳細化モデル	77
5.3.2	出会い頭事故発生シミュレーション	79
5.3.3	シミュレーション条件	79
5.3.4	シミュレーション結果と考察	81
5.4	まとめ	84
6.	結論	85
	謝辞	87
	参考文献	88
	付録	91

目 次

1	交通事故発生状況 [1]	1
2	事故類型別発生件数 [1]	2
3	事故類型別事故発生状況 [1]	2
4	地形別・道路形状別の交通事故の発生割合 [2]	3
5	一時不停止の割合 [3]	4
6	出会い頭事故の発生した交差点形状 [4]	5
7	一時停止あり交差点での違反割合 [4]	5
8	一時停止あり交差点での出会い頭事故の人的要因 [4]	6
9	一時不停止の時の行動類型 [4]	6
10	Liu らの認知情報処理モデル [8]	9
11	Archer らの認知情報処理モデル [12]	9
12	模範的ドライバの交差点通過行動フロー	13
13	交差点形状と交差点の座標の取り方	14
14	①交差点進入準備プロセス	16
15	ドライバの視野	16
16	②停止プロセス	17
17	③交差点状況把握プロセス	19
18	④交差点通過プロセス	21
19	シミュレーション結果の表示	23
20	衝突予想地点	24
21	自車位置と速度 (距離軸)	29
22	自車位置と視野 (距離軸)	29
23	非優先側車両と非優先側車両の位置関係	30
24	車両位置と視野の時間変化	34
25	エラーパターン 1(安全確認見落とし型)	39
26	エラーパターン 2(見越し運転型)	40
27	エラーパターン 3(交差点見落とし型)	41
28	エラーパターン 4(安全確認他車発見型)	42

29	エラーパターン 5(距離速度誤判断型)	43
30	エラーパターン 6(一時停止見落とし型)	44
31	車両位置と視野の時間変化	48
32	非優先側ドライバの詳細化モデルを用いた結果	54
33	安全確認見落とし型の詳細化モデルを用いた結果	55
34	見越し運転型の詳細化モデルを用いた結果	56
35	交差点見落とし型の詳細化モデルを用いた結果	57
36	安全確認他車発見型の詳細化モデルを用いた結果	58
37	距離速度誤判断型 (X=10%) の詳細化モデルを用いた結果	59
38	距離速度誤判断型 (X=50%) の詳細化モデルを用いた結果	60
39	距離速度誤判断型 (X=100%) の詳細化モデルを用いた結果	61
40	一時停止見落とし型の詳細化モデルを用いた結果	62
41	各エラーパターン別の事故対策	66
42	警告判定指標の概念	69
43	発見位置と発見距離の定義	70
44	パラメータの関係図	72
45	安全時間領域	74
46	アラームに反応するドライバの詳細化モデル	78
47	車両位置と視野の時間変化	83

表 目 次

1	非優先側の行動類型と事故発生確率 [5]	7
2	シミュレーション条件	25
3	非優先側ドライバのモデルパラメータ	26
4	交差点通過行動シミュレーションのログデータ	28
5	事故が発生した条件	32
6	各エラーパターンに関連する要因と出会い頭事故発生件数	37
7	エラーパターンと交差点進入行動の関係	38

8	ドライバのモデルパラメータ	46
9	事故発生時の初期条件	47
10	事故・ヒヤリハット発生件数	49
11	エラーの発生確率の推定結果	51
12	初期速度 10km/h の時の安全時間領域の変化	74
13	初期速度 20km/h の時の安全時間領域の変化	75
14	初期速度 30km/h の時の安全時間領域の変化	75
15	初期速度 40km/h の時の安全時間領域の変化	76
16	初期速度 50km/h の時の安全時間領域の変化	76
17	ドライバのモデルパラメータ	80
18	すべてのシミュレーション結果と考察	81

1. 序論

1.1 研究背景

図1[1]に交通事故発生状況の推移を示す。戦後交通事故件数および死亡者数は増加し続けていたものの、近年交通事故件数、および死亡者数は減少傾向にある。しかし、依然として死亡者数は平成19年で5744人、負傷者数は100万人あまりと高い水準にある。

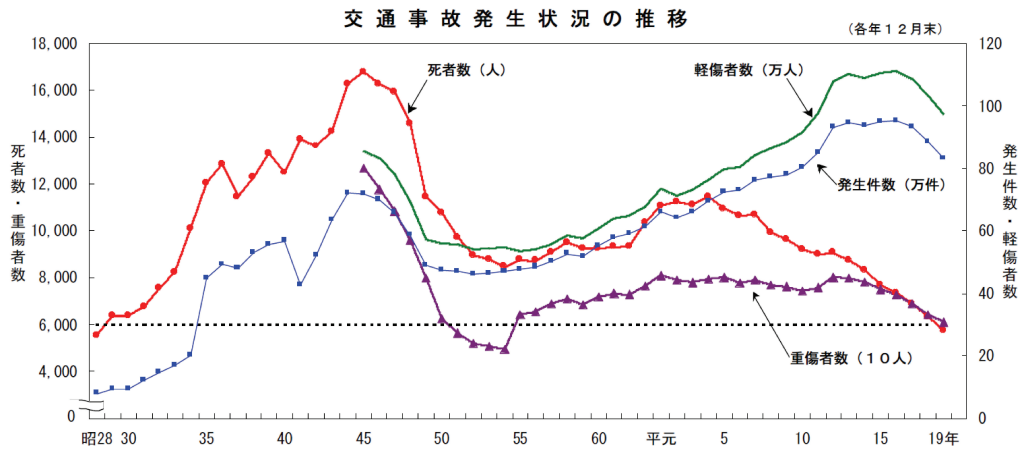


図1 交通事故発生状況 [1]

交通事故における事故類型別発生件数の推移を図2[1]に、平成19年度中の事故類型別交通事故状況を図3[1]に示す。事故類型別発生件数では、追突事故が最も多く、出会い頭事故がそれに次いで多い事が分かる。その一方で、事故類型別交通事故発生状況を見ると、出会い頭事故は死亡事故や重傷事故といった重大な事象に繋がりがやすく、重点的な対策が必要であると言える。

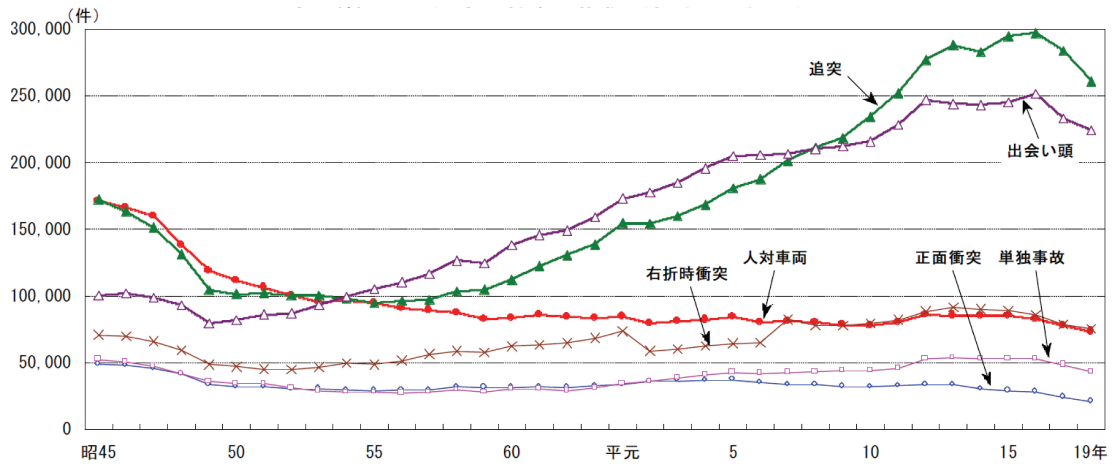


図2 事故類型別発生件数 [1]

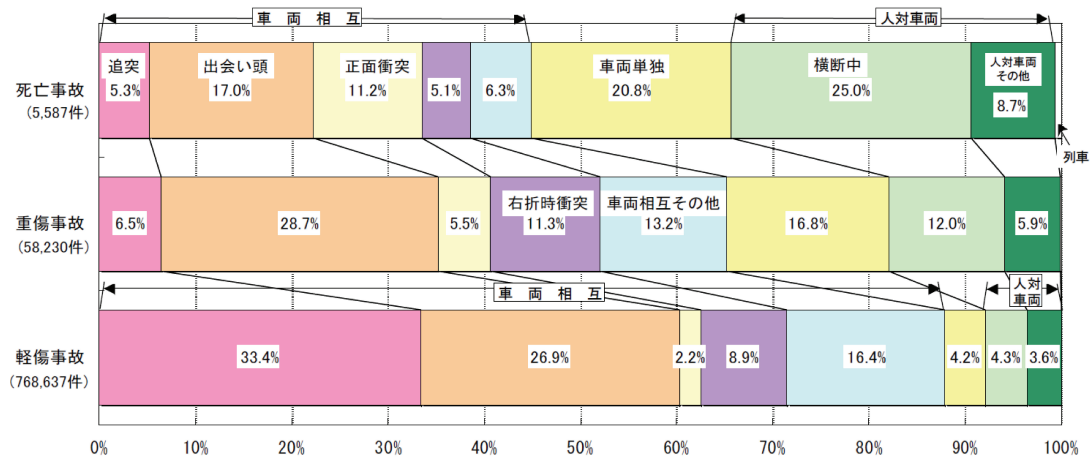


図3 事故類型別事故発生状況 [1]

出会い頭事故の地形別・道路形状別の交通事故の発生割合を図4[2]に示す。出会い頭事故は、市街地で75.4%発生していて、特に市街地の無信号交差点で多く発生している。

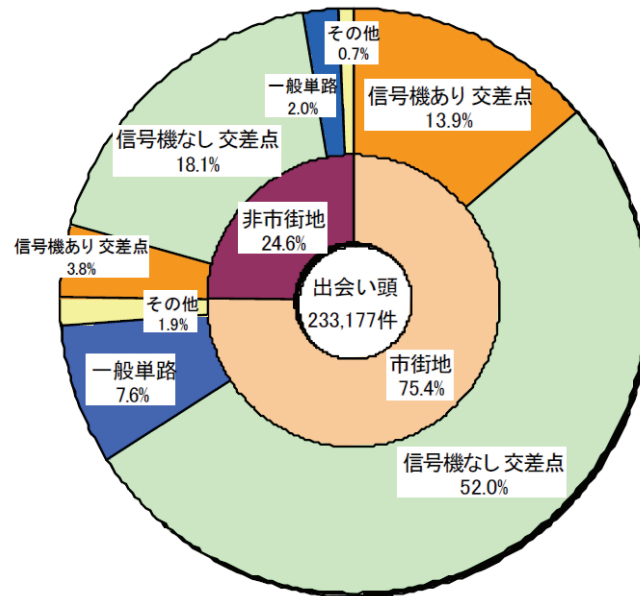


図4 地形別・道路形状別の交通事故の発生割合 [2]

1.2 先行研究

橋川ら [3] は, 見通しの良い無信号交差点1箇所で, ビデオカメラ3台を用いて交差点内のどの場所でドライバが一時停止をどの程度行っているかについて観測を行った. 記録した109台から記録不備などの不的確な事例を除いた101台についてビデオデータを解析した. その結果を, 図5に示す. 停止した車両はわずかに15件であった. また同研究の中で行われた別の観測では, 同じ交差点にレーザー距離計を設置し, 無信号交差点に進入してくる非優先側車両の位置・速度の観測を行い, 最低速度や, ある地点での速度分布などの調査を行った. その結果, 多くの一般ドライバが一時停止線の手前で一旦停止を行わず, 停止線付近で徐行をしているという実態を明らかにした. ドライバがこのような行動をとる理由としては, ドライバが判断エラーを起こし, 停止義務を守っていないという事が考えられる.

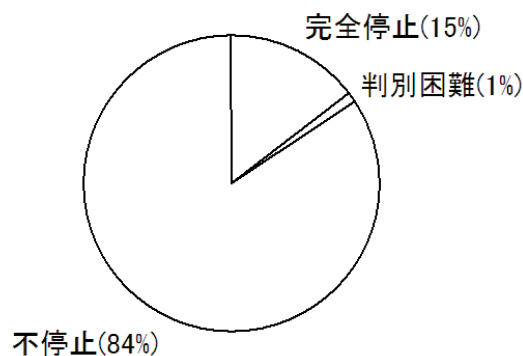


図5 一時不停止の割合 [3]

次に, 木村ら [4] は, (財) 交通事故総合分析センターの平成13年度のマクロデータを用いて, 一時停止ありの交差点での事故の解析を行った. 図6に出会い頭事故の発生した交差点形状を, 図7に一時停止あり交差点での違反割合を, 図8に一時停止あり交差点での出会い頭事故の人的要因を, 図9に一時不停止の場合の行動

類型を示す。その結果、違反別では一時不停止が多く、人的要因では安全確認不足がほとんどで、一時不停止違反では減速せずに通過する事多いことを示した。ドライバが安全確認不足や、減速をしないといった行動を起こす背景としては、認知エラーや判断エラーが存在する事が考えられる。

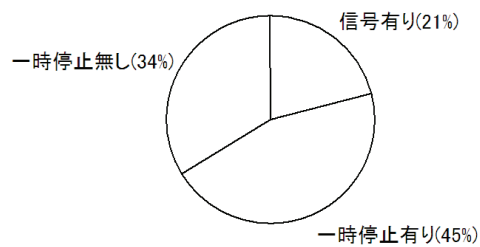


図 6 出会い頭事故の発生した交差点形状 [4]

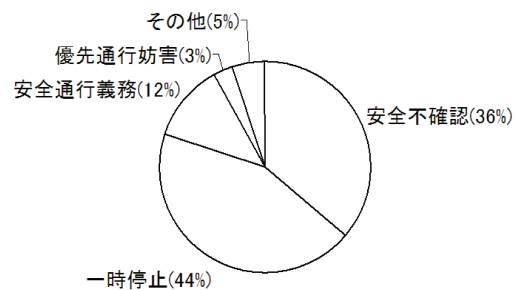


図 7 一時停止あり交差点での違反割合 [4]

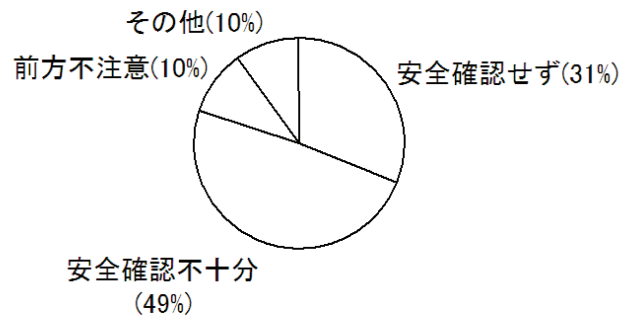


図 8 一時停止あり交差点での出会い頭事故の人的要因 [4]

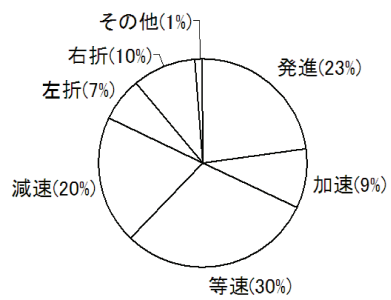


図 9 一時不停止の時の行動類型 [4]

平松らの研究 [5] では, 無信号交差点での出会い頭事故のマクロデータと, 交差点行動の観測値から, ベイズの定理を用いて, 非優先側の交差点進入行動別の出会い頭事故の発生確率を推定している. その結果を, 表 1 に示す. 交差点に減速せず等速で進入し, 交差点内で加速する, もしくは等速を維持した時, 衝突する危険性が高いことを示した.

表 1 非優先側の行動類型と事故発生確率 [5]

行動類型	事故データ $P(D A)$	観察データ $P(D \neg A)$	事故発生確率 $P(A D)$	倍率
発進	0.374	0.747	1.54E-07	1
等速加速	0.061	0.001	1.86E-05	121.0
直進等速	0.217	0.008	8.38E-06	54.6
直進減速	0.116	0.115	3.09E-07	2.0
右折	0.130	0.054	7.43E-07	4.8
左折	0.094	0.074	3.88E-07	2.5
その他	0.009	0.001	2.67E-06	
合計	1.000	1.000	3.07E-07	

以上の研究は, 出会い頭事故に潜む要因として, ドライバの認知・判断エラーがあり, それが重大な事故に繋がる可能性があることを示している.

神田ら [6] は, 交通事故総合分析センターのマイクロデータから事故事例をバリエーションツリーにより分析し, 事故発生時の非優先側ドライバの交差点進入行動を 6 種類の主要なパターンに分類した. さらに, これら 6 種類のパターンに含まれる認知・判断に関わる変動要因を交差点進入行動の順に並べた非優先側ドライバの交差点進入モデルを構築し, 事故防止対策立案に用いることを提案した. 具体的には, 一般的なドライバの交差点進入行動の観察結果からバリエーションツリーによる分析の基準となる通常の運転行動を規定し, 変動要因を定義した. しかし, 著者らも指摘しているように, より精度の高い事故要因の分析を行うためには, 模範的なドライバの交差点進入行動をベースに標準的な運転行動を規定し, それに

基づき変動要因を再検討する必要がある。

出会い頭事故の主要な要因であるドライバの認知エラーや判断エラーを分析するためには、交差点通過行動を認知情報処理のレベルでモデル化しなければならない。交差点通過行動を規定した道路交通法では、非優先側車両は、停止線の前で一時停止をすること、安全な速度で交差点に進入するなどの運転行動規範を定めている。しかし、道路交通法が定める運転行動規範は定性的で、実際のドライバの運転行動を詳しく認知情報処理レベルで分析し評価するには不十分である。

一方、実際のドライバの運転行動を、ハンドルやペダルなどの操作記録、速度などの車両データ、ドライバの視線移動データなどの計測データから、詳しく分析する研究もすでに始められている。小坂ら [7] は、模範的な運転行動を取ると期待できる、特別な訓練を受けた熟練ドライバの交差点通過行動データを、実車による走行実験により収集し、ペダル操作量や視線移動の記録から交差点通過行動を認知情報処理レベルのタスクに分解した上でフローを用いて表現した。これは、模範的な交差点通過行動における基本的な認知情報処理プロセスをモデル化したものと考えられる。このモデルを参考として、一般ドライバの交差点通過行動における模範的な交差点通過行動とのズレを見つけて、ズレを直すための教示策や支援策を立案することを提案している。しかし、このモデルは、模範的なドライバの交差点通過時の認知情報処理プロセスをタスクのシーケンスとして表したもので、そのままコンピュータシミュレーションできるわけではない。

認知情報処理レベルではコンピュータシミュレーションを用いた分析を行う取り組みが行われている。Liu ら [8]-[9] は、化学プラントにおけるプラントオペレータを模擬するようなコンピュータシミュレーションモデルを作成し、アラームシステムの評価を行った。Archer ら [10]-[12] は、ヘルシンキ工科大学で開発されたマイクロ交通シミュレータ HUTSIM[13] にドライバの認知情報処理モデルを組み込み、都市での交通安全指標の検討や、自動車の速度制限技術である ISA(Intelligent Speed Adaptation) の有効性の検討などを行っている。Liu らの認知情報処理モデルを図 10 に、Archer らの認知情報処理モデルを図 11 に示す。

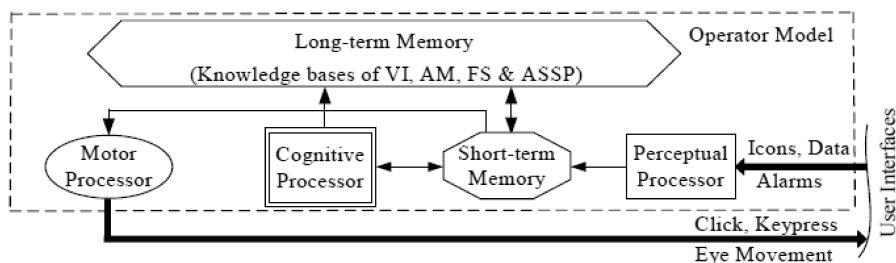


図 10 Liu らの認知情報処理モデル [8]

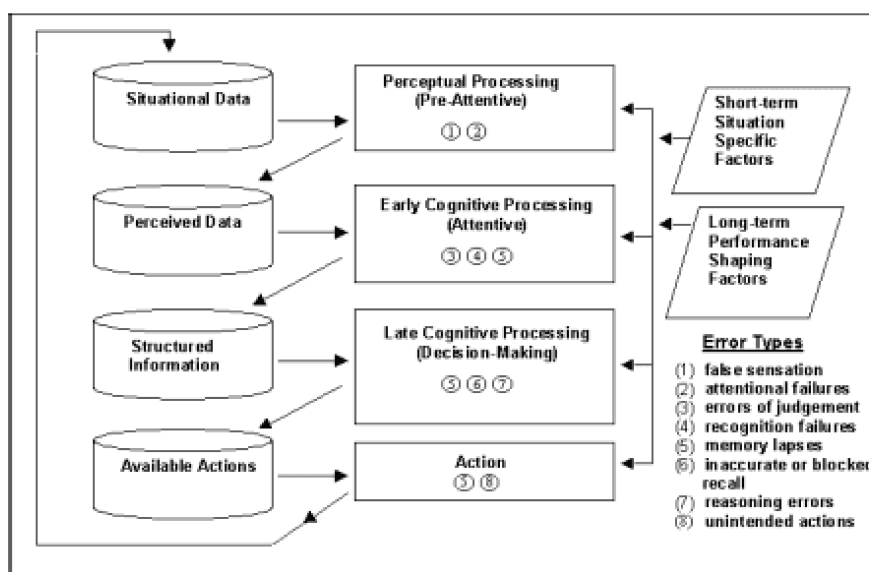


図 11 Archer らの認知情報処理モデル [12]

出会い頭事故の認知・判断エラーを分析するためには、認知情報処理レベルでコンピュータシミュレーションする方法が適していると言える。その理由は、大きく分けて3つある。

1つめの理由は、シミュレーションは様々な条件を変えて数多く分析することができることである。出会い頭事故は図4のように、無信号交差点で多く発生しているが、無信号交差点の数は非常に多い。また、無信号交差点はその性質上、信号のある交差点と比べて交通量が少ない場合が多い。加えて、無信号交差点での出会い頭事故に関するマイクロデータを観察すると、1つの無信号交差点で起こる出会い頭事故の件数は、多くてもせいぜい数件というオーダーである。以上のような理由で、様々な条件で分析することが重要である。

2つめの理由は、シミュレーションは認知情報処理のレベルで事故に至るまでのプロセスを詳細に分析することが出来ることである。ドライバーが引き起こす事故原因の実に90%以上が、認知・判断エラーを始めとするヒューマンエラーであると言われている[14]。事故が起きる原因はヒューマンエラーであるが、ヒューマンエラーを起こしても、その時の交通状況などの様々な条件が重ならないと事故には至らない。事故を分析するためには、ドライバーの認知・判断エラーが、どのような交通状況によって引き起こされるかを、時系列を追って調べる事が重要である。

3つめの理由は、シミュレーションでは同一条件での実験を繰り返すことができることがあげられる。一般的に、多数のドライバーに同一条件で、ある実験を繰り返して行うのには、非常に労力と手間を必要とする。その点、シミュレータを用いれば、同一の条件下で実験を繰り返し行う事ができ、効率的であると言える。

1.3 研究目的

本研究では、無信号交差点での自動車同士の出会い頭事故やヒヤリ・ハットの発生メカニズムをシミュレーションによって分析するために、交差点通過時の認知情報処理プロセスをコンピュータシミュレーションするためのプログラムを開発する。まず、タスクシーケンスとして表された模範的なドライバの交差点通過行動モデルをベースに、ドライバの基本的な認知情報処理プロセスをシミュレーションするためのプログラムを開発する。続いて、交差点通過行動シミュレーションを行い、このシミュレーションプログラムの妥当性を検証する。

基本的な認知情報処理プロセスのシミュレーションプログラムに、ヒューマンエラーを付加すれば、様々なタイプのドライバの不安全運転行動のシミュレーションを行うことができる。本論文では例として、安全確認が不十分な一般ドライバについて、事故やヒヤリ・ハット事象が発生する可能性を、いろいろな条件のもとでシミュレーションによって調べる。同時に、ドライバの不安全な運転行動から事故が発生するメカニズムを詳しく分析する方法について検討する。

続いて、神田ら [6] が提案した事故発生直前の非優先側ドライバのエラーパターンのモデル化を行い、そのモデルを用いてシミュレーションを行い、どのエラーパターンが事故に繋がりがやすいかについて調査を行う。また、事故防止策としてアラームシステムを構成し、反応遅れとその効果について考察する。

2. 無信号交差点非優先側ドライバ通過行動のモデル化

2.1 模範的ドライバの交差点通過行動フロー

小坂ら [7] は, 実車による走行実験により, 模範的な運転行動を取ると期待できる特別な訓練を受けた熟練ドライバの直進での交差点通過行動データを収集した. ビデオ画像, ドライブレコーダによるアクセルやブレーキ操作記録, アイマークレコーダによる視線移動記録から交差点通過行動を認知情報処理レベルのタスクに分解し, 模範的なドライバの交差点通過行動における基本的な認知情報処理プロセスをタスクシーケンスとしてモデル化した.

この模範的ドライバの交差点通過行動フローを図 12 に示す. このモデルは, ①交差点進入準備プロセス, ②停止プロセス, ③交差点状況把握プロセス, ④交差点通過プロセスから構成されている.

①交差点進入準備プロセスは, ドライバが交差点の存在に気づき交差点に接近しながら減速を意識するプロセスである. ②停止プロセスは, 減速を行い, 交差点前で一時停止, もしくは徐行を行うプロセスである. ③交差点状況把握プロセスは, 一時停止または徐行を行ってから, 左右確認などによって交差点状況を把握し, 安全確認を行って交差点への進入を決断するプロセスである. ④交差点通過プロセスは, 交差点に進入し, 通過し終わるまでのプロセスである. それぞれのプロセスは, 知覚プロセス, 判断プロセス, 操作プロセスに分解してフローとして表されている. 小坂らはモデルを提案したものの, 一つの参照モデルの位置付けで, コンピュータシミュレーションをすることまで考えていない. 本研究では, この模範的ドライバの交差点通過行動フローを参考にして, 非優先側ドライバの交差点通過行動をコンピュータ上でシミュレーションするための非優先側ドライバモデルの詳細化を行う.

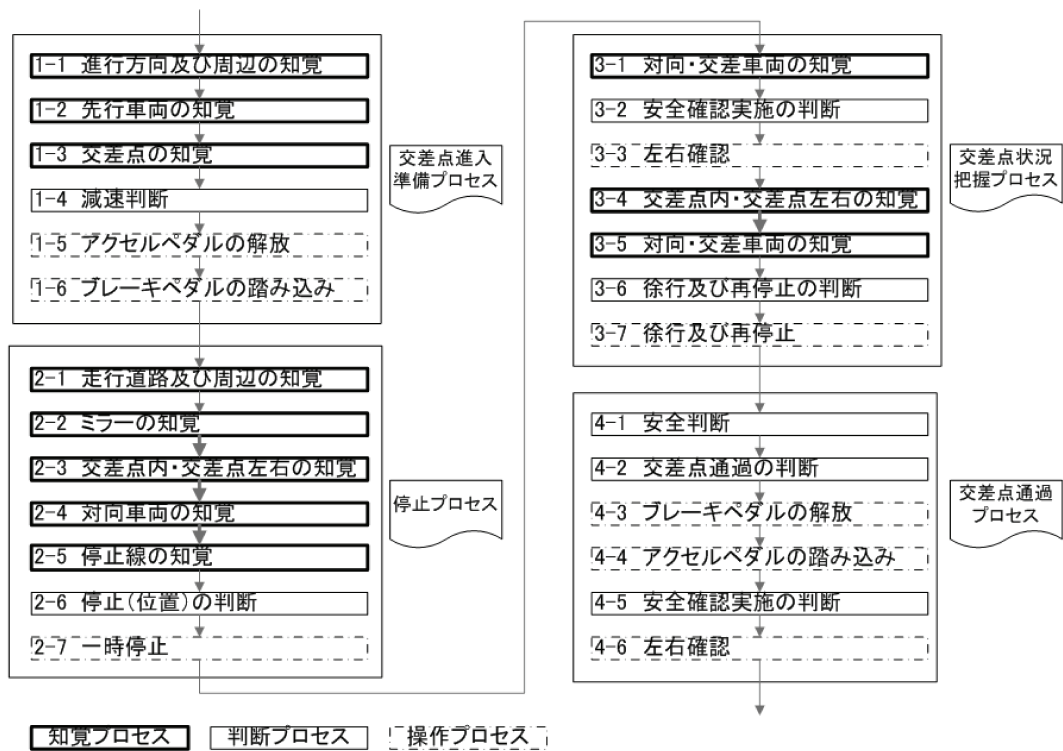


図 12 模範的ドライバの交差点通過行動フロー

2.2 交差点環境のモデル化

基本となる交差点の形状と交差点の座標系の取り方を図13に示す。座標系の原点は交差点の中心で、x軸は右向きを正、y軸は上向きを正とした。実在する交差点を参考にして、次のような寸法を採用した。道路の幅は、優先側・非優先側共に6m、原点から横断歩道までの距離は5m、横断歩道の幅は3m、原点から一時停止線までの距離は10mとした。また、優先車両及び非優先車両の大きさは、幅1.5m、長さ4mとした。一時停止線から交差点入り口まで7mある。

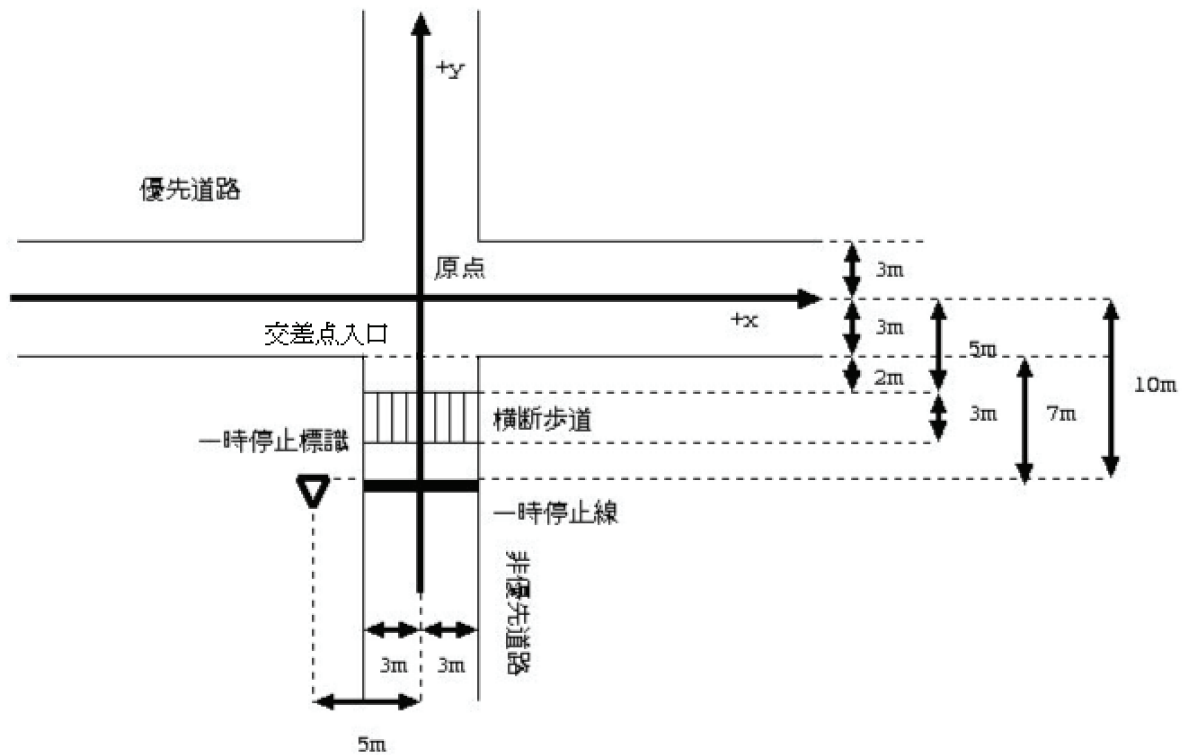


図13 交差点形状と交差点の座標の取り方

2.3 非優先側ドライバの詳細化モデル

本研究で開発する非優先側ドライバモデルも、交差点進入準備プロセス、停止プロセス、交差点状況把握プロセス、交差点通過プロセスの四つのプロセスから構成される。各プロセスの具体的な認知情報処理フローを以下で説明する。

(1) 交差点通過行動プロセス

交差点進入準備プロセスの認知情報処理フローを図 14 に示す。図中の平行四辺形は知覚、ひし形は判断、四角形は操作を表す。視覚に関して本論文では、図 15 に示す自動車先端を中心とした円弧状の領域をドライバの視野とみなした。ドライバは、視野に入った物体のみを知覚することができる。また、安全確認のため一定の角速度で一定の角度まで左右に視線を移動するとした。交差点進入準備プロセスでは、一時停止標識の知覚後、減速を判断し、アクセルを放しブレーキを使って一定の減速度で減速する。ただし、一定の減速度で減速した場合、停止線に到達するまでに自車速度が 0 になるときは減速せず、そのままの速度で走行するとした。

図中に、減速の判断をするひし形があるが、判断部の分岐がない。このような表現となっているのは、様々なタイプのドライバについてシミュレーションプログラムを拡張することを考慮したためである。他の 3 プロセスのフローにも、同様な理由で分岐のない判断部が含まれる。

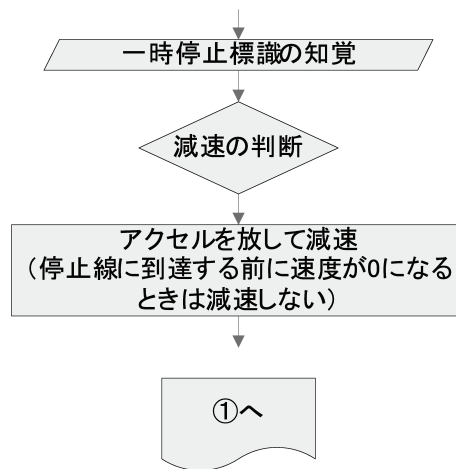


図 14 ①交差点進入準備プロセス

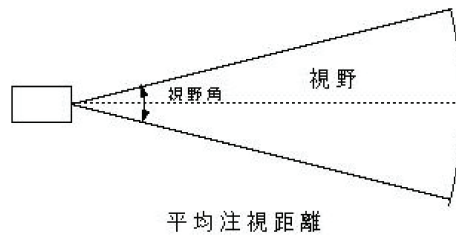


図 15 ドライバの視野

(2) 停止プロセス

停止プロセスの認知情報処理フローを図 16 に示す. このプロセスでは, 横断歩道の知覚, 横断歩道付近の安全確認後, 横断歩道付近の歩行者の有無に関わらずブレーキを踏んで減速し, 一時停止線上で停止する. 減速度には上限値があるため, 減速開始位置, 車両の初期速度によっては, 一時停止線上で止まらない場合も起こる.

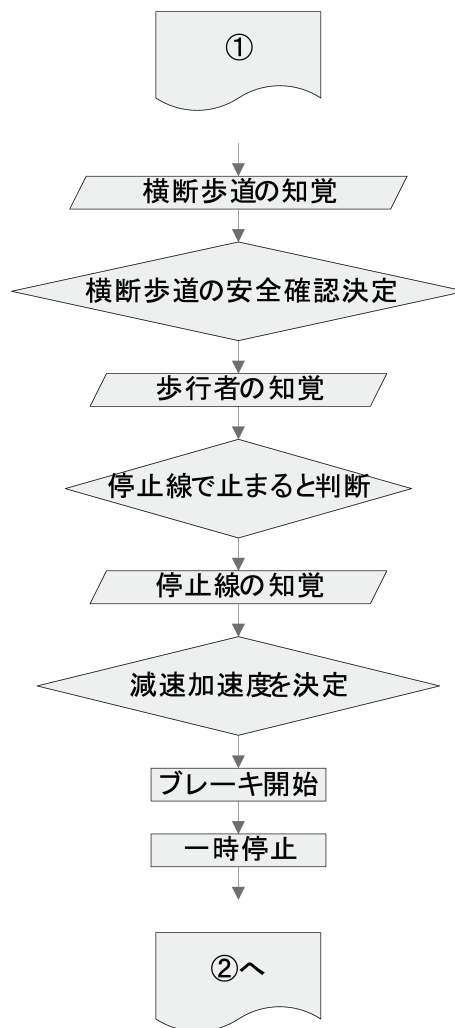


図 16 ②停止プロセス

(3) 交差点状況把握プロセス

交差点状況把握プロセスの認知情報処理フローを図 17 に示す。一時停止線で横断歩道付近の安全確認した後、徐行しながら車の先頭が交差点入り口に達するまで前進し停止することとした。

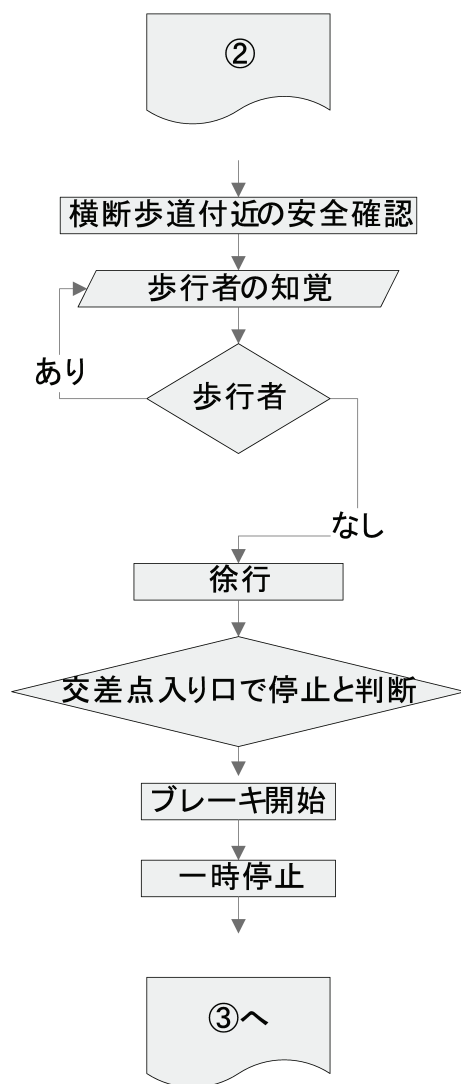
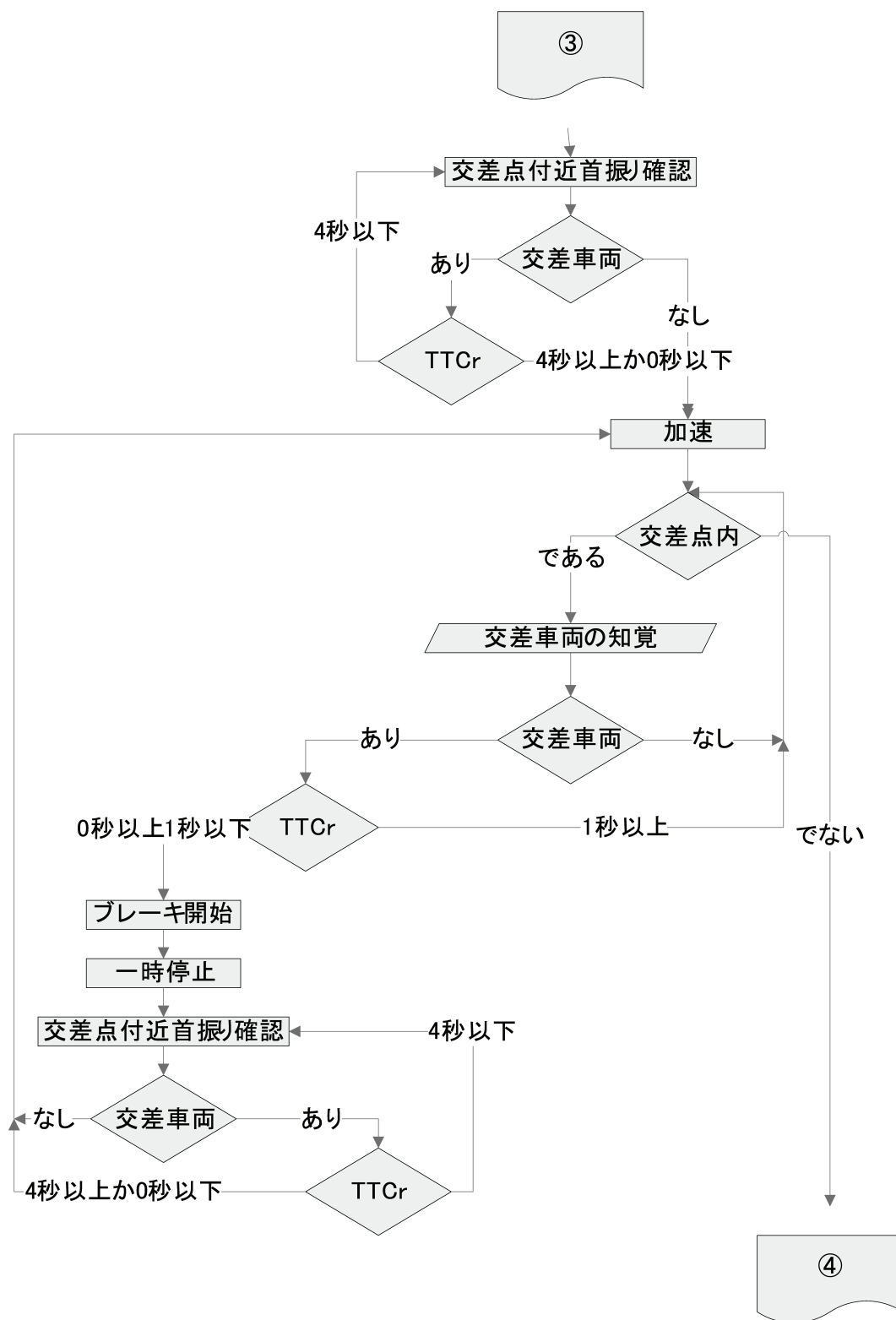


図 17 ③交差点状況把握プロセス

(4) 交差点通過プロセス

交差点通過プロセスの認知情報処理フローを図18に示す。まず、交差道路の安全確認を行い、交差車両の有無を確認する。交差車両がない場合や、交差車両がその時点での速度で走行した場合の交差点入口到達までにかかる時間 TTCr (Time To Cross road) が4秒以上、もしくは0秒以下のとき、非優先側車両は加速し交差点を通過するとした。4秒というしきい値は、図の交差点を非優先側車両が停止状態から加速度 2m/s^2 で通過するのに必要な時間の2秒を2倍した値から決めた。交差点を通過中に交差車両を知覚したとき、交差車両の TTCr が0秒以上1秒以下であれば急ブレーキを踏んで停止する。TTCr が1秒より長ければ、加速を継続する。交差車両の存在によって停止した場合、交差車両が通過してしまうか、TTCr が4秒以上になれば、再び加速し交差点を通過するとした。



21
 図 18 ④交差点通過プロセス

2.4 優先側ドライバの詳細化モデル

非優先側ドライバのエラーが出会い頭事故に与える影響を調べるために、優先側ドライバモデルは、ワーストケースを考え、非優先側ドライバの行動に関係なく等速で直進する事とした。また、衝突が予想されるような場面でも、優先側はブレーキをかけないこととした。

3. 交差点通過行動シミュレーションプログラムの開発

3.1 シミュレーションプログラム

交差点通過行動シミュレーションは、優先側車両と非優先側車両の初期位置・初期速度を決めると、両者のドライバモデルに基づいて両車両の動きが計算され、交差点通過結果が出力される。非優先側ドライバモデルには視線移動範囲などいくつかのパラメータが含まれていて調整できるようになっている。シミュレーション結果は、図8のようなアニメーションとして表示したり、シミュレーション結果をログデータとして出力したりすることができる。

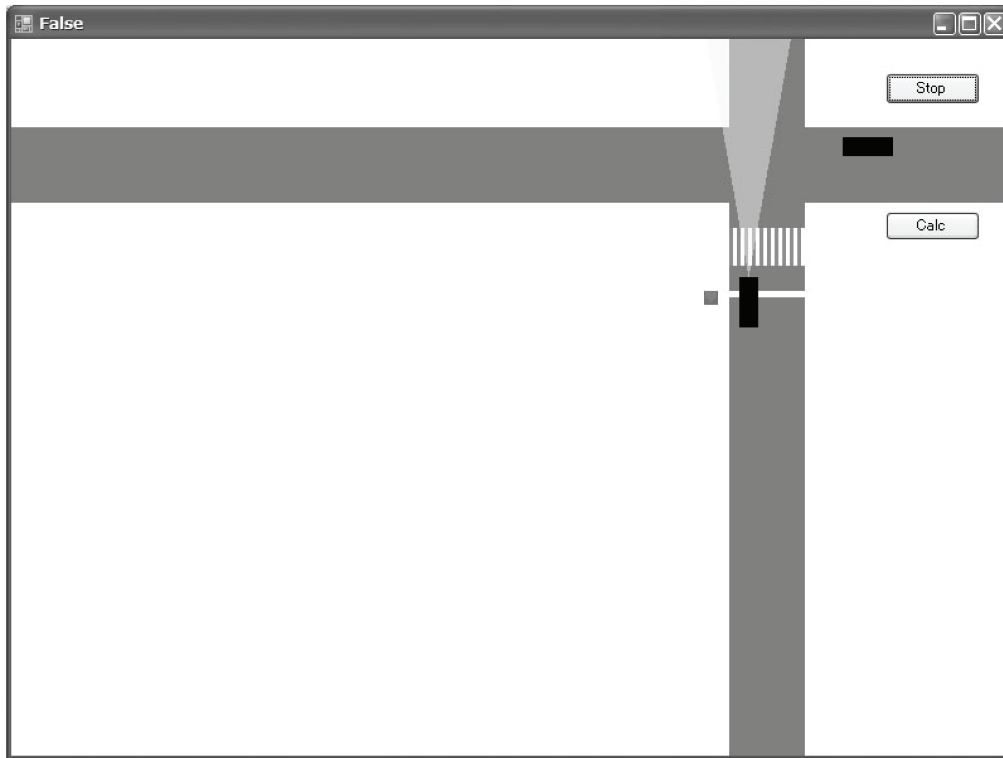


図 19 シミュレーション結果の表示

3.2 通過行動の安全性評価指標

事故の発生や不安全行動を評価するため、指標としてPET(Post Encroachment Time)[15]を採用した。PETとは、ある一台の車の進行方向ともう一台の車の進行方向の交差する場所（衝突予想地点）を、一台の車が通過してから、もう一台の車が通過するまでの時間である。衝突予想地点を図20に示す。PETが小さい条件は、より衝突の危険性が高い条件である。本論文では、PETが0のときを「事故」、PETが3秒未満を「ヒヤリ・ハット」とした。

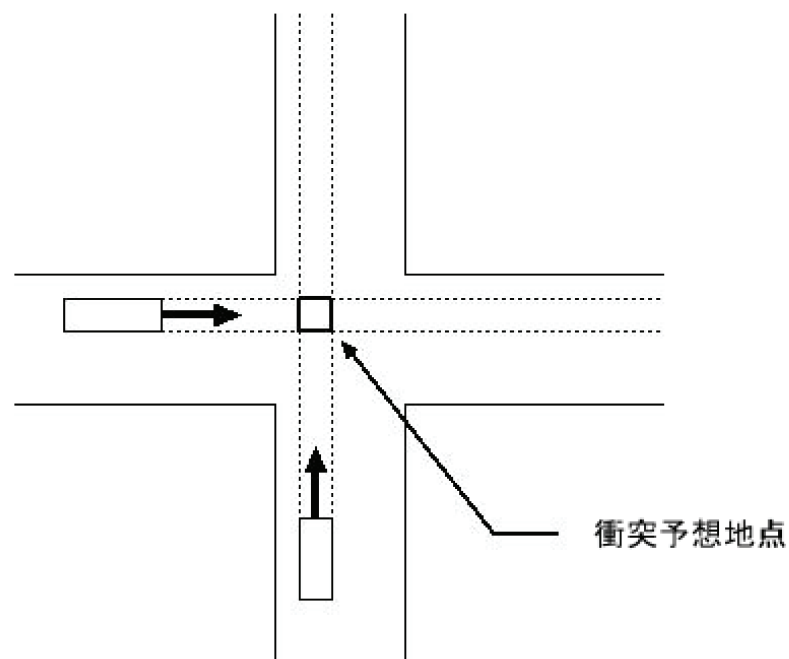


図 20 衝突予想地点

3.3 シミュレーション例

開発した非優先側および優先側ドライバの交差点通過行動を記述したシミュレーションプログラムを検証するため、優先側車両1台、非優先側車両1台、歩行者なしの条件で交差点通過行動シミュレーションを行い、非優先側ドライバの知

覚,判断,操作の認知情報処理過程,車両速度や位置などのログデータを記録した.シミュレーション条件を表2に,非優先側ドライバモデルのパラメータを表3に示す.2台の車両が交差点に接近し,非優先側ドライバが回避行動を取る場面を想定し,表のようなシミュレーション条件を設定した.視線移動では,視線を自車の進行方向に対して左にX(度),右にX(度)まで回転させる.ここでXは,ドライバパラメータとして定められた視線の移動角度である.また,視線の回転角速度は一定とする.

表2 シミュレーション条件

車両	初期条件	初期速度
非優先側	-100m	30km/h
優先側	-140m	20km/h

表 3 非優先側ドライバのモデルパラメータ

パラメータ	設定値
ドライバの視距離	64m [16]
ドライバの中心視野角度	20° [17]
ドライバの視線の移動範囲	
横断歩道付近確認時	左右 5°
一時停止時	左右 45°
交差点通過判断時	左右 90°
ドライバの視線の各移動速度	62.5°/s
ドライバの知覚時間	160ms [18]-[19]
ドライバの判断時間	320ms [18]-[19]
ドライバの操作時間	80ms [18]-[19]
非優先側車両加速度	
アクセル開放による減速時	-1m/s ²
ブレーキ操作による減速時	-2m/s ²
緊急停止時	-4m/s ²
発進時	+2/m ²
非優先側車両速度	
徐行時	9km/h
交差点通過後	36km/h

表2および表3の条件について,シミュレーション開始からの時刻,非優先側車両位置,知覚,判断,操作の内容を記録したログデータを表4に示す.また,車両位置と速度の関係を図21に,非優先側車両の位置と視野の関係を図22に,優先側車両と非優先側車両の時刻20秒からの1秒おきの位置関係を図23に示す.視線角度はx軸正の方向から見て右に向いたときを正とする.図21および図22の①~⑤は,表4中の①~⑤と対応する.

①では横断歩道付近の安全確認のために視線の移動を行っている.②では,一時停止線で止まると決定した後,ブレーキを踏み始めている.③では,一時停止線で停止後,歩道付近の安全確認をしている.③~④にかけては,徐行している.④~⑤にかけては,交差道路通過のために必要な最終的な安全確認のため停止した.⑤では,交差点進入前の最終的な安全確認を行っている.

表4のログデータによれば,非優先ドライバは,24.48秒に優先側車両を知覚している.このときの両車の位置関係を見ると,優先側車両は原点より-3.8m,非優先側車両は原点より-4.7mの位置にあった.両車が交差点を通過し終えるまでシミュレーションを続けた結果,このシミュレーション条件におけるPET値は7.72秒となった.

シミュレーションで得られた非優先側ドライバモデルの挙動は,図12に示した模範的ドライバの交差点通過行動フローを再現していることが分かる.開発したシミュレーションプログラムは,パラメータを調整することによって,特徴の異なるドライバの運転行動をコンピュータ上で模擬するのにも使える.

表 4 交差点通過行動シミュレーションのログデータ

時刻 [秒]	自車位置 [m]	知覚	判断	操作
0.00	-100.0		シミュレーション開始	
2.92	-75.7	一時停止標識を知覚		
3.24	-73.0		減速を決定	
3.48	-71.0	横断歩道を知覚		
3.80	-68.3		横断歩道安全確認を決定	
4.04	-66.3	歩行者なしを知覚①		
5.08	-57.7		停止線での停止を決定	
5.28	-55.7	停止線を知覚		
5.64	-53.0		ブレーキ開始を決定	
5.72	-52.3			ブレーキ操作②
15.40	-12.2			一時停止
15.64	-12.2	歩行者なしを知覚③		
18.88	-12.2		徐行を決定	
19.04	-12.2			徐行④
24.44	-4.7			一時停止⑤
24.48	-4.7	交差車両ありを知覚		
30.60	-4.7		交差車両は通過と判断	
30.68	-4.7			加速開始
36.08	+24.5		シミュレーション終了	

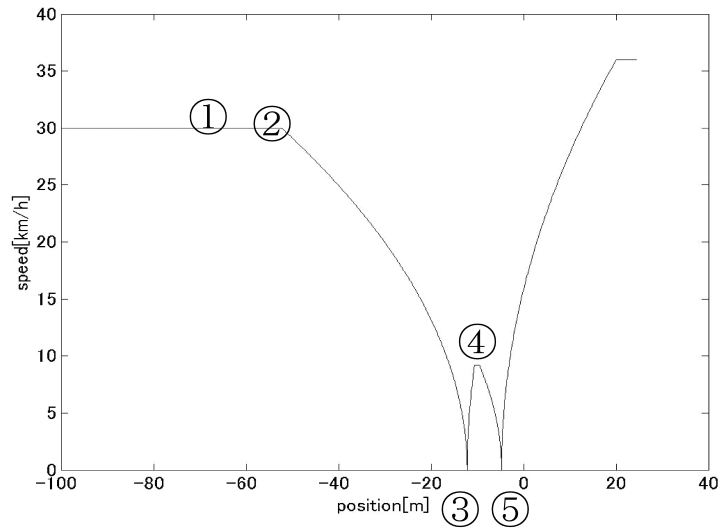


図 21 自転車位置と速度 (距離軸)

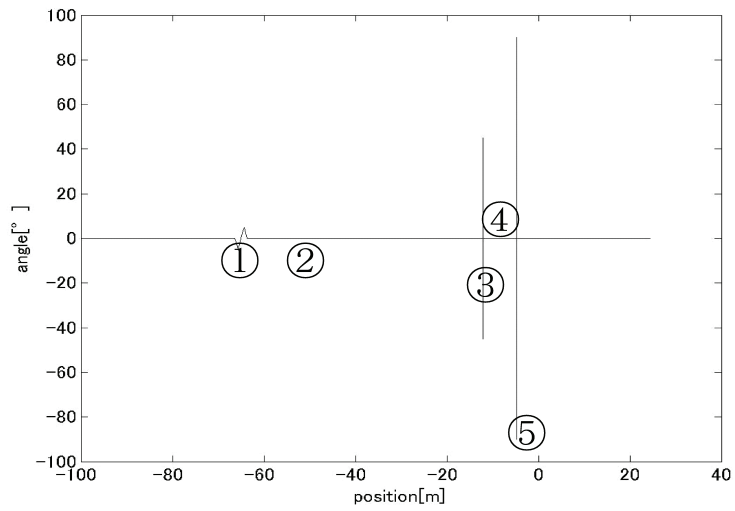


図 22 自転車位置と視野 (距離軸)

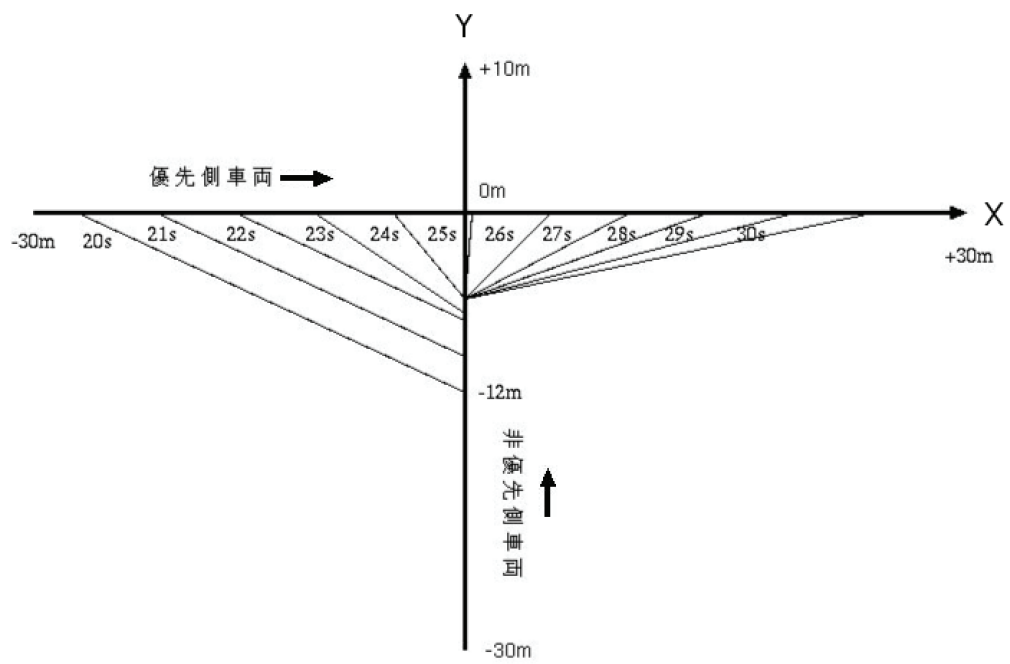


図 23 非優先側車両と非優先側車両の位置関係

3.4 種々の条件下でのシミュレーション

非優先側車両の初期位置を固定したまま、非優先側車両の初期速度、優先側車両の初期位置及び初期速度の3条件を様々に変化させてシミュレーションを行い、事故がどのような条件で発生するかを調べた。ここでは、一般ドライバに広く見られる、十分な安全確認をしないドライバのシミュレーションを行うため、視線の左右の移動範囲を小さい値に設定した。具体的には、表3に示すドライバパラメータのうち、交差点通過判断時の視線の移動範囲を左右45°とした。

3.4.1 シミュレーション条件

非優先側車両の初期位置は -100 m、初期速度は 10 km/h から 50 km/h までの 10 km/h おきの 5 通りとした。優先側車両の初期速度は 10 km/h から 100 km/h までの 10 km/h おきの 10 通り、初期位置は左側 -20 m から -200 m まで 20 m おき、および右側 20 m から 200 m まで 20 m おきの合計 20 通りとした。シミュレーション条件のすべての組合せは 1000 通りとなる。

3.4.2 シミュレーション結果

1000 通りのシミュレーションの結果、非優先側ドライバの事故は 7 件、ヒヤリ・ハットは 8 件発生した。事故が発生した 7 条件を表にまとめた。

表 5 事故が発生した条件

条件	優先側車両 初期位置 [m]	優先側車両 初期速度 [km/h]	非優先側車 両初期速度 [km/h]
(a)	-80	10	40
(b)	-160	20	40
(c)	80	30	10
(d)	120	50	20
(e)	160	20	40
(f)	180	10	10
(g)	180	30	50

3.4.3 事故事例の分析

事故が発生した条件 (a), すなわち優先側車両の初期位置-80m, 初期速度 10km/h, 非優先側の初期速度 40km/h におけるシミュレーション結果をログデータから詳しく調べた. 時速 40km/h で走行している非優先車両は, 一時停止線上で停止した. 見通しを得るために少し前進し, 視線を左右に振って交差点付近を確認した. この時点で, 優先側車両は左側から交差点にかなり近づいていたものの, 非優先側ドライバーの視界に入らなかった. それゆえ, 非優先側ドライバーが交差点通過の判断をして加速したところ, そこには優先車両がいて, 急停止する間もなく衝突した.

この事故事例を, 優先側車両と非優先側車両の位置関係と視線の向きから詳しく見てみよう. 図 24 に, シミュレーション開始後 23.12 秒, 24.56 秒, 25.28 秒, 27.32 秒における非優先側ドライバーの視野と二車の位置関係を示す. 23.12 秒に, 非優先側車両のドライバーは, 交差道路の左奥を確認しているが, 左 45° までしか確認していないため優先側車両は視野の中に入っていない. 続いて, 24.56 秒には右 45°, 25.28 秒には正面方向に視線の向きを変えて交差車両の有無を確認したが, このドライバーの視線移動の範囲が狭く, 左側から交差点に進入する優先側車両の存在を知覚でき

なかった。その結果、非優先車両は25.48秒に交差点を通過するために発進し、27.32秒に左側からの優先側車両と衝突した。

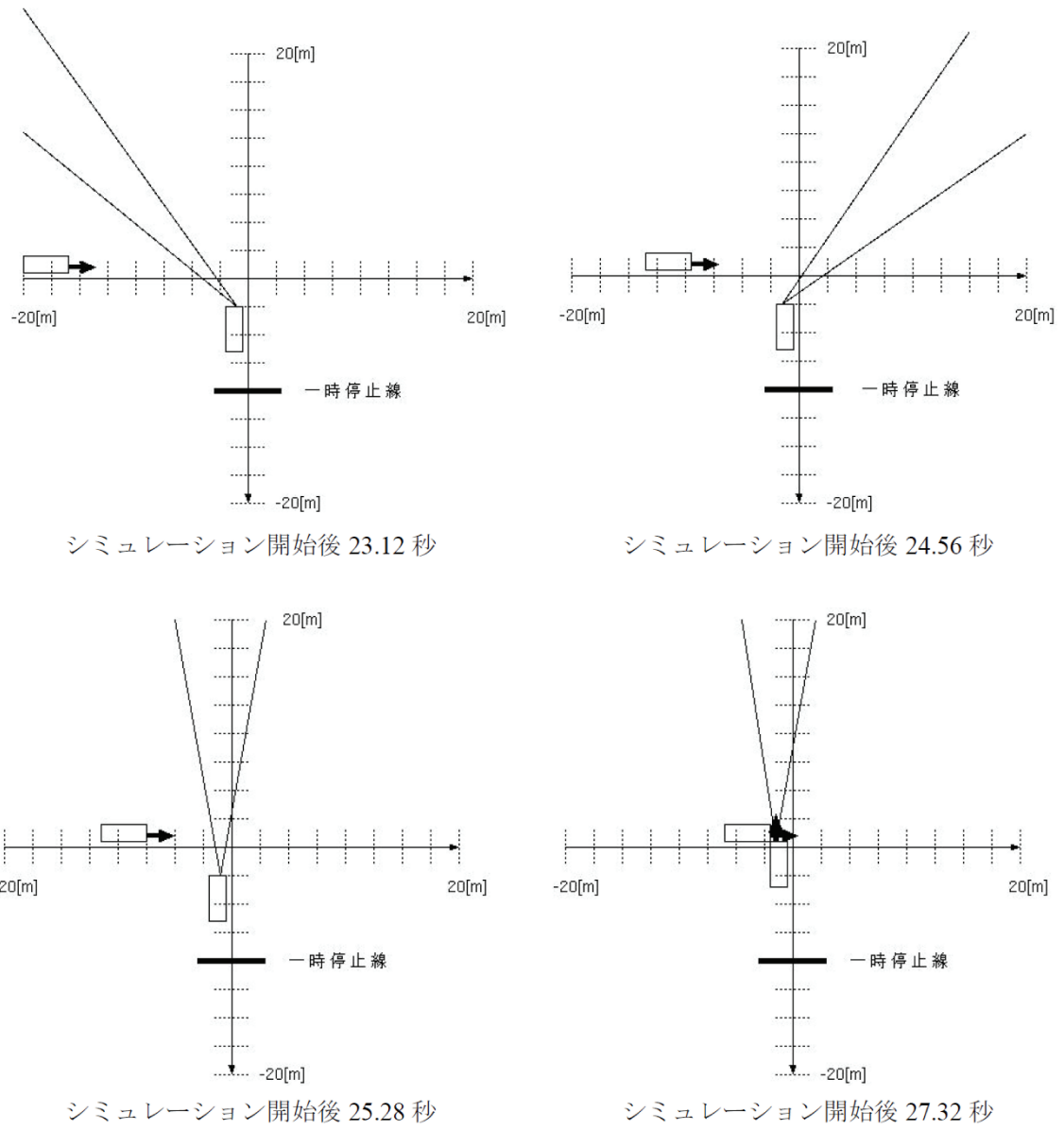


図 24 車両位置と視野の時間変化

3.5 まとめ

本章では, 小坂ら [7] のタスクシーケンスによって表された模範的なドライバの交差点通過行動をベースに, いろいろなタイプのドライバの交差点通過行動を模擬するためのシミュレーションプログラムを開発した. まず, 模範的なドライバの交差点通過行動が再現できることを確認した. 続いて, 安全確認が不十分な一般ドライバを想定し, 様々に交差車両の条件を変えて交差点通過行動シミュレーションを繰り返した結果, 交差点進入直前の安全確認の不十分さが, 事故やヒヤリ・ハット事象を引き起こすことが, シミュレーションで再現出来た. また, シミュレーション結果を詳しく分析することによって, ドライバの視線移動範囲と事故の発生の関係を明らかにすることができることがわかった.

4. 典型的な出会い頭事故シミュレーション

前章では, 小坂ら [7] のタスクシーケンスによって表された模範的なドライバの交差点通過行動をベースに, いろいろなタイプのドライバの交差点通過行動を模擬するためのシミュレーションプログラムを開発した. 本章では, 開発したシミュレーションプログラムに, 神田ら [6] が提案した, 出会い頭事故発生時のドライバの交差点進入直前の運転行動エラーパターンをモデル化し組み込むことで, エラーパターンの出会い頭事故に繋がる可能性の調査と PET 値を用いた事故発生条件の可視化を行う.

4.1 事故発生時の非優先側ドライバの交差点進入行動パターン

神田ら [6] は, 無信号交差点での四輪車同士の出会い頭事故のマイクロデータ 140 件についてバリエーションツリーを用いた人的要因分析を行い, 解析不可能なものや分類不可能なものを除いた 121 件について, 出会い頭事故発生時の非優先側の交差点進入行動を 10 パターンに分類をした. そのうち発生頻度の高い 6 パターンについて詳細に検討を行っている. 次に, 6 パターンの名前と定義を示す.

(1) エラーパターン 1(安全確認見落とし型)

安全確認を実施したが, 交差車両が認められなかったため交差点に進入した.

(2) エラーパターン 2(見越し運転型)

交差点に接近した際に, 交差車両はいないだろうと予測して, 交差点に進入した.

(3) エラーパターン 3(交差点見落とし型)

交差点に接近した際に, その存在に気づかずに進行した.

(4) エラーパターン 4(安全確認他車発見型)

交差点に接近した際に, 交差車両を発見したが, 衝突した車両を見落とし, 発見した車両の動静のみに注意を払い, タイミングを見計らって進入した.

(5) エラーパターン 5(距離速度誤判断型)

安全確認を実施した際に交差車両を発見し, 先に通過できると判断して交差点に進入した.

(6) エラーパターン6(一時停止見落とし型)

交差点の存在には気づいたが、一時停止があることに気づかずそのまま交差点に進入した

各エラーパターンに関連する要因と、各エラーパターンの発生件数をまとめたものを表6に示す。○は関連すると考えられる要因、×は関連すると考えられない要因を表している。また、各進入パターンと、出会い頭事故発生時の交差点進入行動（一時停止・減速進行・減速後加速・等速・不明）との関係を表7に示す。

表6 各エラーパターンに関連する要因と出会い頭事故発生件数

エラーパターン	心身状態	初通行	見通し	通行経験	交通状況	安全確認	性別	件数
1	○							27
2			○	○	○	○		21
3	○	○						16
4	×	×				○		15
5	×		○				○	13
6	○	○						12

4.2 不安全なドライバの詳細化モデル

神田ら [6] が提案した出会い頭事故発生時の非優先側の運転行動を、コンピューターシミュレーション出来る形にするためモデル化を行った。神田ら [6] が提案した6種類のエラーパターン全てについてモデル化を試みた。2章で作成した無信号交差点における非優先側ドライバの詳細化モデルを基本として、運転行動の一部を危険な行動と入れ替えることで、各モデルは作成された。各モデルの作成プロセスを次に示す。

表 7 エラーパターンと交差点進入行動の関係

	1	2	3	4	5	6
一時停止	5	1	0	8	4	0
減速進行	4	5	0	4	2	2
減速後加速	4	1	0	1	4	0
等速	11	10	16	2	3	10
不明	3	4	0	0	0	0
合計	27	21	16	15	13	12

(1) エラーパターン 1(安全確認見落とし型)

安全確認見落とし型は、安全確認をしたにも関わらず、交差車両を認知する事ができず、事故を起こすことを特徴としている。このパターンでは、2章で作成した非優先側ドライバの詳細化モデルを基本として、交差車両の安全確認時に交差車両が視覚に入っても見落とすという設定とした。モデルを図 25 に示す。

(2) エラーパターン 2(見越し運転型)

見越し運転型は、交差点進入時に安全であろうと見越すことで、安全確認を怠り、等速で進入する事が特徴である。ただし、交差点見落とし型や一時停止見落とし型のような心身状態の悪化による判断の低下はないので、交差車両には反応するモデルとした。モデルは、非優先側ドライバの詳細化モデルから、交差点進入準備プロセス、停止プロセス、交差点状況把握プロセスを除いた、交差点通過プロセスの交差点通過部分のみとなっている。モデルを図 26 に示す。

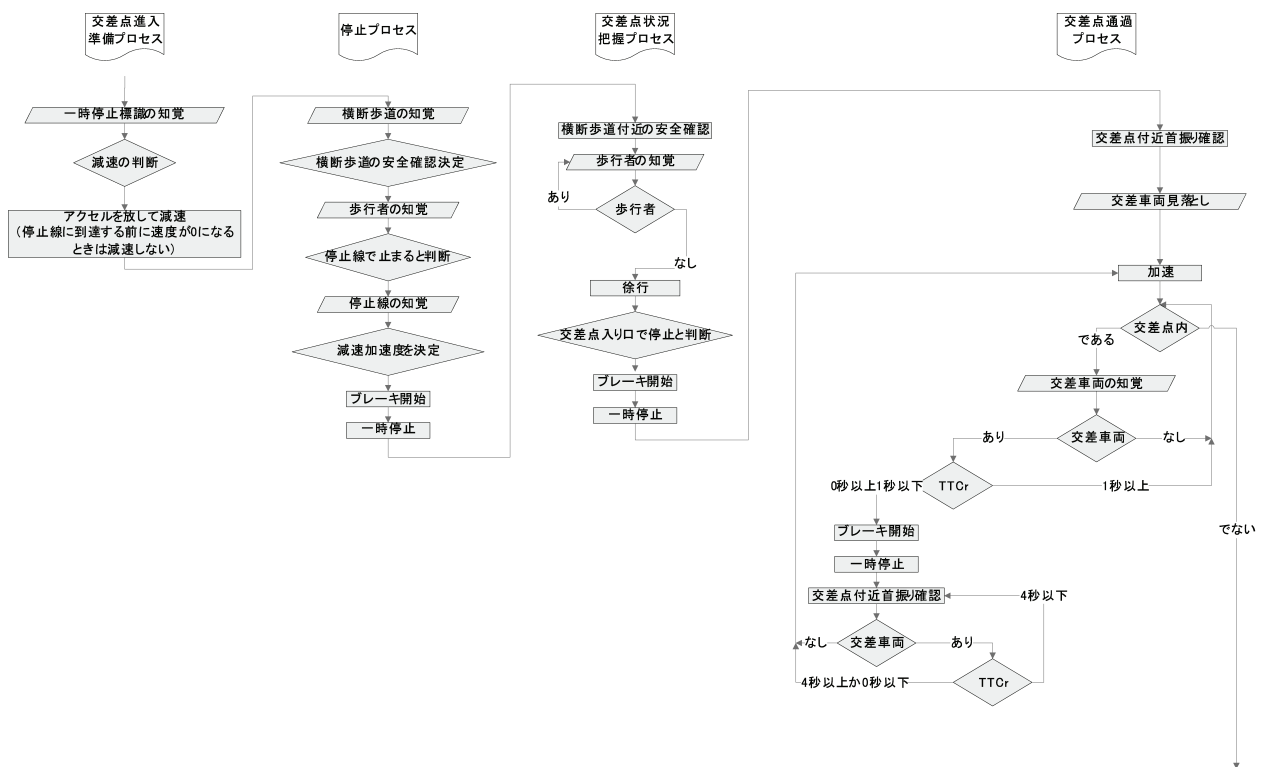


図 25 エラーパターン1(安全確認見落とし型)

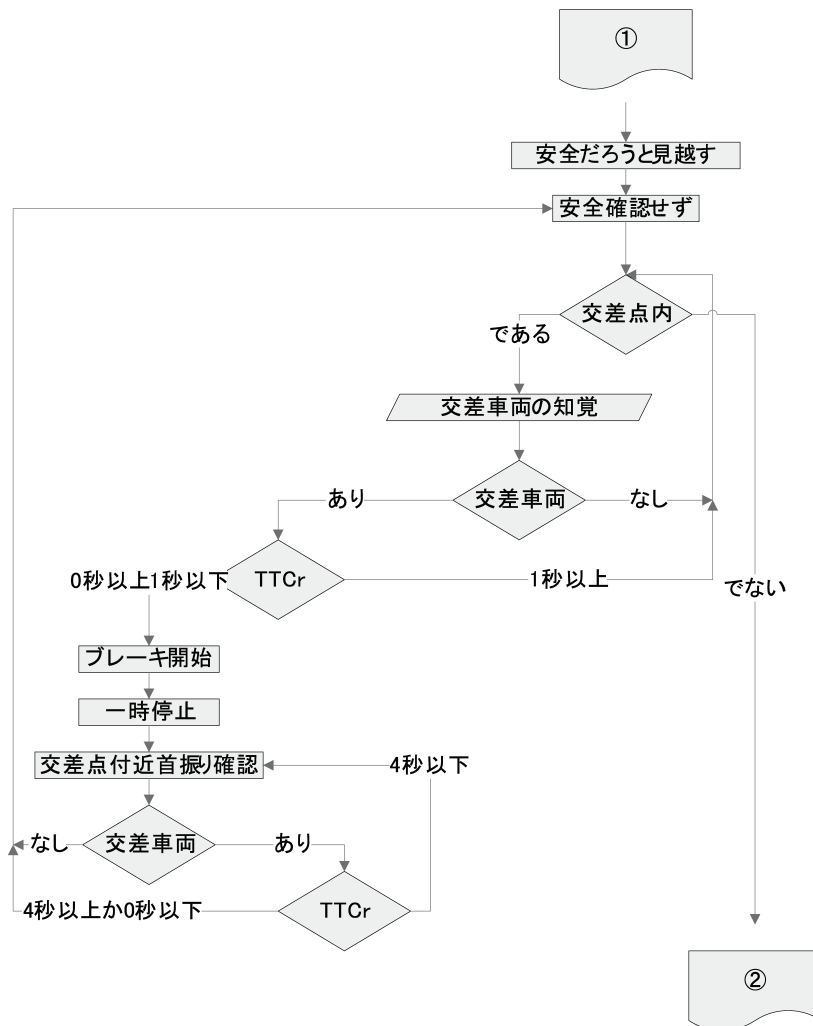


図 26 エラーパターン 2(見越し運転型)

(3) エラーパターン3(交差点見落とし型)

交差点見落とし型は、心身状態の不良による認知・判断能力の低下を原因として、交差点に気づかず、安全確認も行わずそのまま交差点に等速に進入するケースが多い。このモデルでは、非優先側ドライバの詳細化モデルの交差点進入準備プロセスの入り口でエラーが発生したと考えられるので、停止プロセス、交差点状況把握プロセス、交差点通過プロセスはスキップされる。そのため、安全確認もしないで等速で交差点に進入し、交差車両にも危険を感じず回避を行わない設定とした。モデルを図27に示す。

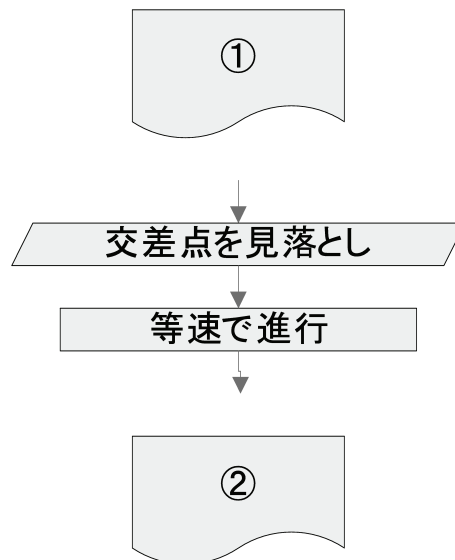


図 27 エラーパターン3(交差点見落とし型)

(4) エラーパターン4(安全確認他車発見型)

安全確認他車発見型は、交差点進入直前の安全確認時に一方の車両に気を取られ、もう一方の車両を見落とし、事故を起こすことを特徴としている。そのため、2章で作成した非優先側ドライバの詳細化モデルを基本として、交差車両が複数台ある場合に最初に認知した車両以外を視覚に入っても見落とすという設定とした。モデルを図28に示す。

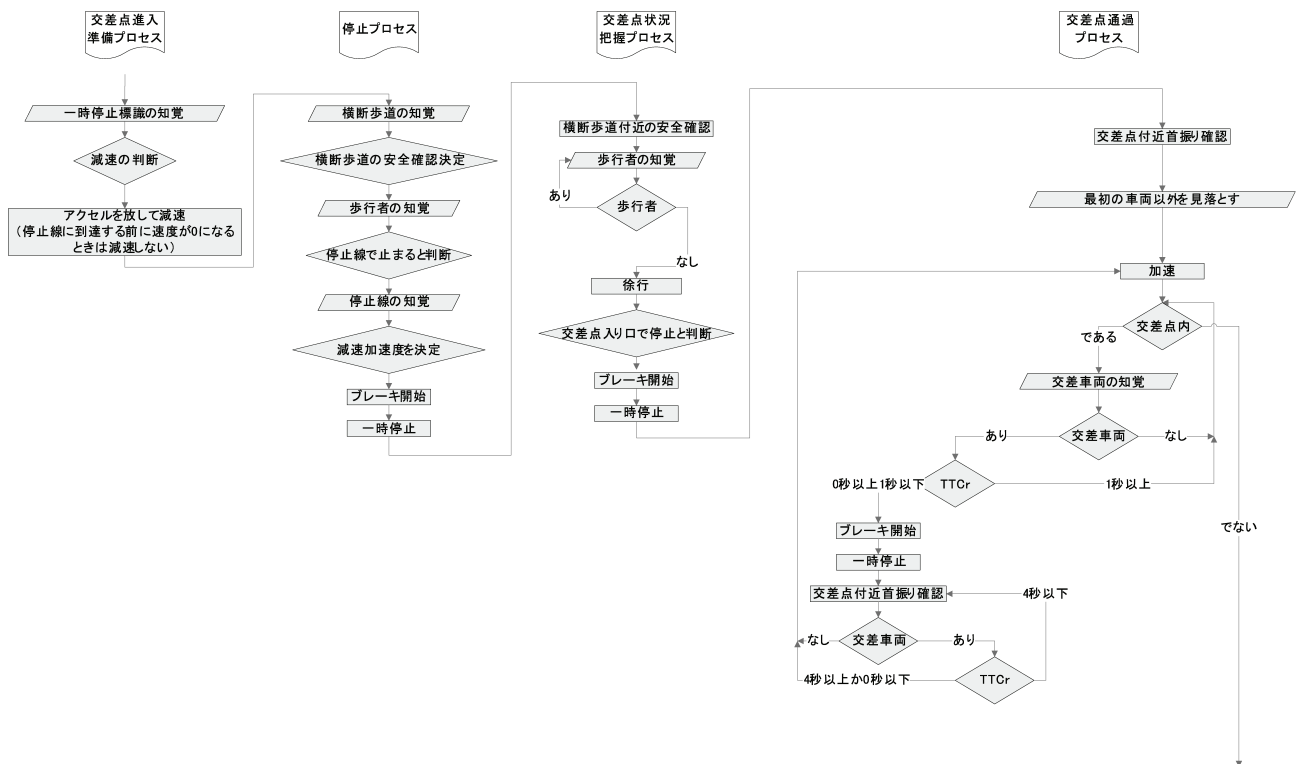


図 28 エラーパターン4(安全確認他車発見型)

(5) エラーパターン5(距離速度誤判断型)

距離速度誤判断型は、交差点進入直前の安全確認時に交差車両との距離や・交差車両の速度を見誤り事故を起こすことを特徴としている。そのため、2章で作成した非優先側ドライバの詳細化モデルを基本として、ドライバが感じている安全確認時の交差車両の TTCr を、誤って真値から X % 大きな値とした。

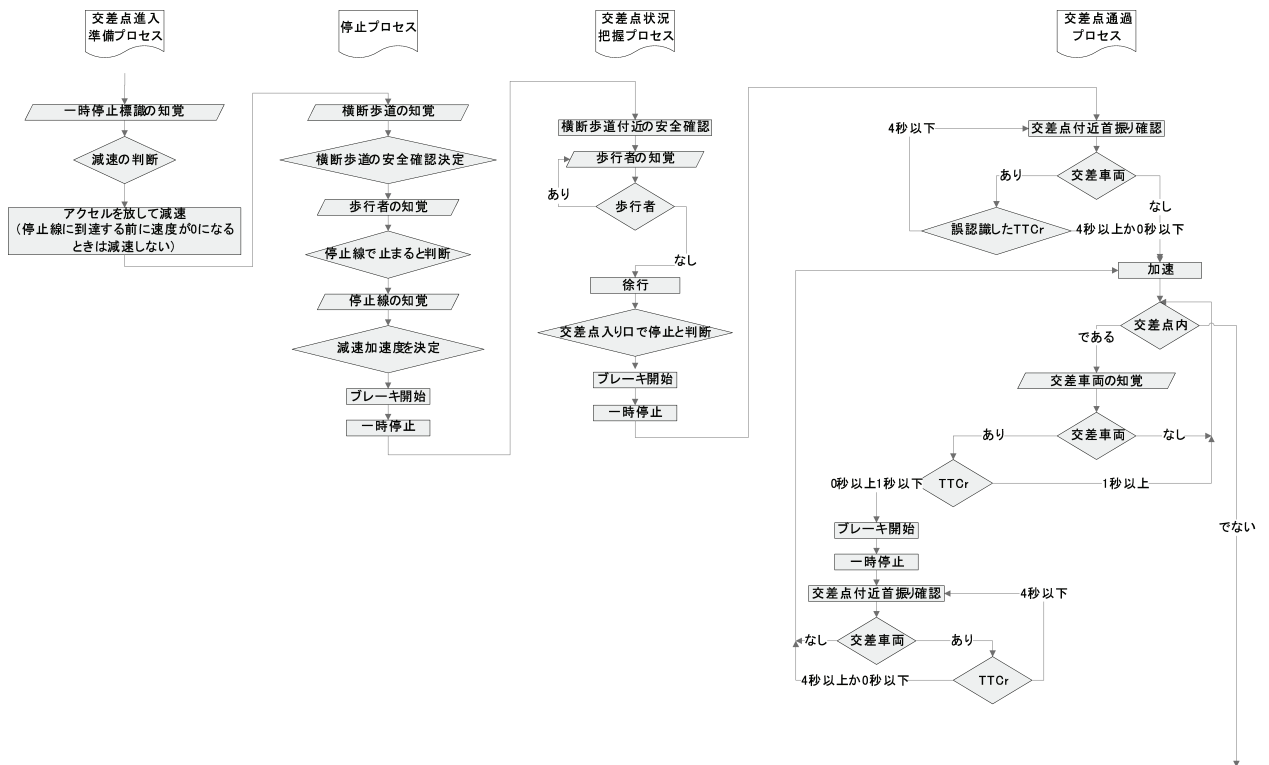


図 29 エラーパターン5(距離速度誤判断型)

(6) エラーパターン6(一時停止見落とし型)

一時停止見落とし型は, 交差点見落とし型と同じく心身状態の不良による認知・判断能力の低下を原因としていて, 交差点には気づいたものの, 非優先であるという認識が無い状態で, 安全確認も行わずそのまま交差点に等速に進入するケースが多い. このモデルでは, 非優先側ドライバの詳細化モデルの交差点進入準備プロセスの入り口でエラーが発生したと考えられるので, 停止プロセス, 交差点状況把握プロセス, 交差点通過プロセスはスキップされる. そのため, 交差点に気づくものの, 安全確認もしないで等速で交差点に進入し, 交差車両にも危険を感じず回避を行わない設定とした. モデルを図30に示す.

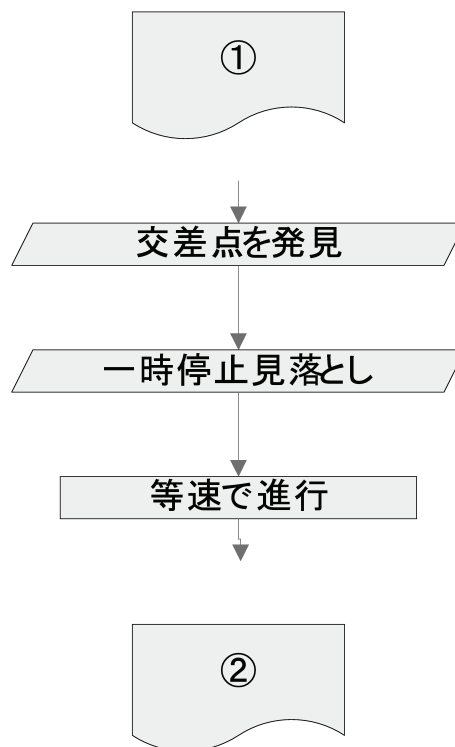


図30 エラーパターン6(一時停止見落とし型)

4.3 出合い頭事故発生シミュレーション

エラーパターン 1(安全確認見落とし型), エラーパターン 2(見越し運転型), エラーパターン 3(交差点見落とし型), エラーパターン 4(安全確認他車発見型), エラーパターン 5(距離速度誤判断型 (X=10)), エラーパターン 5(距離速度誤判断型 (X=50)), エラーパターン 5(距離速度誤判断型 (X=100)), エラーパターン 6(一時停止見落とし型), のそれぞれについて, ドライバの詳細化モデルを用いて出合い頭事故発生シミュレーションを行った.

4.3.1 シミュレーション条件

シミュレーションに用いた交差点形状と交差点の座標の取り方は図 6 と同じである. 非優先側車両の初期位置は-100m, 初期速度は 10km/h から 50km/h までの 10km/h おきの 5 通りとした. 優先側車両の初期速度は 10km/h から 100km/h までの 10km/h おきの 10 通り, 初期位置は左側-20m から-200m まで 20m おき, および右側 20m から 200m まで 20m おきの合計 20 通りとした. 加えて, エラーパターン 4(安全確認他車発見型) ではもう 1 台優先車両が発生し, 初期条件は初期速度 30km/h, 初期位置 200m の固定とした. シミュレーション条件のすべての組合せは 1000 通りとなる. シミュレーションに用いたパラメータは, 表 8 のとおりある.

表 8 ドライバのモデルパラメータ

パラメータ	設定値
ドライバの視距離	64m [16]
ドライバの中心視野角度	20° [17]
ドライバの視線の移動範囲	
横断歩道付近確認時	左右 5°
一時停止時	左右 45°
交差点通過判断時	左右 90°
ドライバの視線の各移動速度	62.5°/s
ドライバの知覚時間	160ms [18]-[19]
ドライバの判断時間	320ms [18]-[19]
ドライバの操作時間	80ms [18]-[19]
非優先側車両加速度	
アクセル開放による減速時	-1m/s ²
ブレーキ操作による減速時	-2m/s ²
緊急停止時	-4m/s ²
発進時	+2/m ²
非優先側車両速度	
徐行時	9km/h
交差点通過後	36km/h

4.3.2 事故事例分析

表9に, エラーパターン4(安全確認他車発見型)の事故発生条件を示す. 事故発生事例のうち, 事例(b)について事故事例の分析を行った. シミュレーション開始後23.8秒に一時停止線で停止したドライバは安全確認を開始し, 25.24秒に左90°方向を向き, 26秒付近で1台目の優先側車両を発見したものの, 28.12秒後に右90°方向を向いた際に2台目の優先側車両を見落とし, 29.56秒後に再び前方を向き, 優先側車両が通過したと判断を行い, 32.16秒後に2台目の優先車両と衝突している.

表9 事故発生時の初期条件

事例	非優先側初期速度 [km/h]	優先側初期速度 [km/h]	優先側初期位置 [m]
(a)	50	10	80
(b)	40	20	180

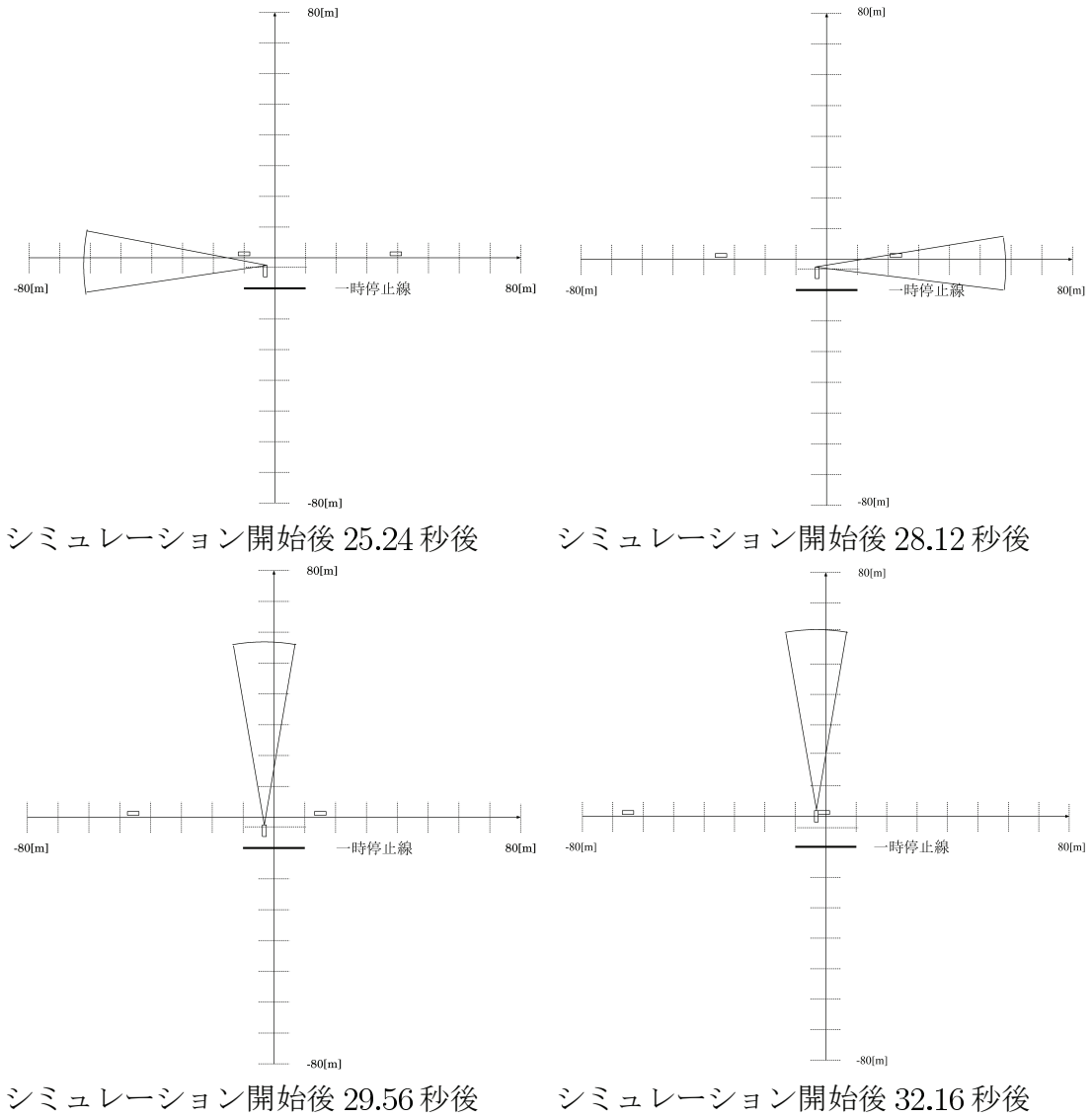


図 31 車両位置と視野の時間変化

4.3.3 危険事象発生件数の比較

エラーパターン 1(安全確認見落とし型), エラーパターン 2(見越し運転型), エラーパターン 3(交差点見落とし型), エラーパターン 4(安全確認他車発見型), エラーパターン 5(距離速度誤判断型 (X=10)), エラーパターン 5(距離速度誤判断型 (X=50)), エラーパターン 5(距離速度誤判断型 (X=100)), エラーパターン 6(一時停止見落とし型), のそれぞれについて, ドライバの詳細化モデルを用いて出会い頭事故発生シミュレーションを行った結果を表 10 に示す.

表 10 事故・ヒヤリハット発生件数

No.	エラーパターン	事故 [件]	ヒヤリ・ハット [件]
1	安全確認見落とし型	7	13
2	見越し運転型	42	75
3	交差点見落とし型	47	155
4	安全確認他車発見型	2	8
5	距離速度誤判断型 (X=10)	0	3
5	距離速度誤判断型 (X=50)	3	4
5	距離速度誤判断型 (X=100)	8	4
6	一時停止見落とし型	47	155

エラーパターン 3(交差点見落とし型) とエラーパターン 6(一時停止見落とし型) では結果が全く同じとなったが, これは, モデルは異なるものの, 結果として同じ運転行動を取ったことによるものである.

事故数およびヒヤリ・ハット数共に, エラーパターン 3(交差点見落とし型) およびエラーパターン 6(一時停止見落とし型) が他のパターンと比べて多くなったが, これは心身状態の低下によって安全確認を行わず等速で交差点へ進入する行為の危険性を示している

エラーパターン 2(見越し運転型) は, エラーパターン 3(交差点見落とし型) とエラーパターン 6(一時停止見落とし型) と比べてヒヤリ・ハット数は半減しているも

の、事故数は同じレベルであり、エラーパターン2(見越し運転)はエラーパターン3(交差点見落とし型)とエラーパターン6(一時停止見落とし型)と同じくらい危険な運転である交差点進入パターンであると言える。

エラーパターン5(距離速度誤判断型)では、ドライバーが感じている安全確認時の交差車両のTTCrの値が、実際の真値からかけ離れるほど事故は増加するという結果となった。

4.3.4 エラーの発生確率の推定

エラーパターンの事故の発生確率 $Pr(A \cap B)$ は、出会い頭事故発生確率 $Pr(C)$ に、エラーパターンの出会い頭事故に占める割合 D をかけたものである。次式のように表される。

$$Pr(A \cap B) = Pr(C) \cdot D \quad (1)$$

また、エラーパターンの事故発生確率 $Pr(A \cap B)$ は条件付き確率を用いて次式のように表される。

$$Pr(A \cap B) = Pr(A) \cdot Pr(B | A) \quad (2)$$

ここで、 $Pr(A)$ はエラーの発生確率、 $Pr(B | A)$ はエラーが発生したときの事故確率である。

(1)式と(2)式は等しいので、エラーの発生確率 $Pr(A)$ は次式で表される。

$$Pr(A) = \frac{Pr(C) \cdot D}{Pr(B | A)} \quad (3)$$

D は表6の各エラーパターンの事故発生件数から導出し、 $Pr(B | A)$ は表10の各エラーパターンの事故発生確率を用いる。ここで、 $Pr(C)$ が未知であるので $Pr(C)$ を推定する必要があるが、平松らの研究[5]で推定した値を使用して、 $Pr(C) = 3.069 \times 10^{-7}$ とする。

エラーの発生確率を推定した結果を表11に示す。倍率は、一時停止見落とし型の発生確率を1とした場合の倍率を示している。この結果、エラーの発生確率は、安全確認他車発見型や安全確認他車発見型や距離速度誤判断型が高いのに対して、見越し運転型や交差点見落とし型や一時停止見落とし型が低いという結果となっ

た.このことから,事故に繋がりやすいエラーパターンはエラーの発生確率が低く,逆に事故に繋がりにくいエラーパターンはエラーの発生確率が高い傾向があることが分かる.

表 11 エラーの発生確率の推定結果

エラーパターン	D	$Pr(B A)$	$Pr(A)$	倍率
安全確認見落とし型	0.193	0.007	8.46×10^{-6}	15.11
見越し運転型	0.150	0.042	1.10×10^{-6}	1.96
交差点見落とし型	0.114	0.047	7.46×10^{-7}	1.33
安全確認他車発見型	0.107	0.002	1.64×10^{-5}	29.34
距離速度誤判断型 (X=50)	0.093	0.003	9.50×10^{-6}	16.97
一時停止見落とし型	0.086	0.047	5.60×10^{-7}	1

4.3.5 危険事象発生条件の可視化

各エラーパターンについて,PET 値を用いて事故やヒヤリ・ハットの発生条件の可視化を行った.比較のため,非優先側ドライバの詳細化モデルを用いた場合の事故やヒヤリ・ハットの発生条件の可視化も同時に行った.各パターンの優先側位置-200[m]から-20[m]までの20[m]おき,および20[m]から200[m]までの20[m]おきについて,x軸を非優先側速度,y軸を優先側速度とし,PETの大きさを色と等高線で表現した.色はPETが小さいほど赤色で表現され,PETが大きくなると青色に近づく.(すなわち,赤色が濃いほど危険な領域であるという事になる.)次に,事故とヒヤリ・ハットが発生した条件も図中にプロットした.図中,○が事故,+はヒヤリ・ハットの発生を表している.

各エラーパターン優先側初期位置が-200[m]の場合について考察を行う.非優先側ドライバの詳細化モデルを用いた結果を図32に,エラーパターン1(安全確認見落とし型)の結果を図33に,エラーパターン2(見越し運転型)の結果を図34に,エラーパターン3(交差点見落とし型)の結果を図35に,エラーパターン4(安全確認

他車発見型)の結果を図36に,エラーパターン5(距離速度誤判断型(X=10%))の結果を図37に,エラーパターン5(距離速度誤判断型(X=50%))の結果を図38に,エラーパターン5(距離速度誤判断型(X=100%))の結果を図39に,エラーパターン6(一時停止見落とし型)の結果を図40に,それぞれ示す.

(1) 非優先側ドライバの詳細化モデル

一部にPET値が10[s]以下の領域が存在しているものの,全体的には黄色~青色の領域が大きな領域を占めていて,比較的安全であると言える.

(2) 安全確認見落とし型

非優先側ドライバの詳細化モデルを用いた場合の等高線と非常に似た形になっている.安全確認見落とし型では,ヒヤリ・ハットの発生した(30,20)の周辺で3[s]の等高線が出来ている点が異なっている.

(3) 見越し運転型

見越し運転型の色の分布を見ると,危険である赤色の領域が非常に大きくなっている.非優先側ドライバの詳細化モデルを用いた場合と比較しても,安全である黄色や緑や青色の領域が少なく,危険である事が読み取れる.

(4) 交差点見落とし型

見越し運転型と比較して,PETが3[s]以下を示す濃い赤色の領域が大きく拡大している事が分かる.そのため,ヒヤリ・ハットの発生件数が,見越し運転型と比べて多くなっている.非優先側ドライバの詳細化モデルを用いた場合と比較しても,安全である黄色や緑や青色の領域が少なく,危険である事が読み取れる.

(5) 安全確認他車発見型

非優先側ドライバの詳細化モデルを用いた場合の等高線と非常に似た形になっており,黄色や緑色や青色の領域が多く安全であると言える.

(6) 距離速度誤判断型 (X=10%)

等高線の 10[s] のラインが,2箇所存在し,そのうちの1つの内部(10,10)でヒヤリ・ハットが発生している.非優先側ドライバの詳細化モデルを用いた場合と比較すると,PETが20[s]以上の等高線の形は良く似ているが,10[s]の等高線の領域が小さくなっている.

(7) 距離速度誤判断型 (X=50%)

距離速度誤判断型 (X=10%) の等高線と比較すると,良く似た等高線を描いている事が分かる.距離速度誤判断型 (X=10%) と同じく (10,10) でヒヤリ・ハットが発生しているのに加えて,10[s] の等高線の内部 (30,20) で事故が発生している.非優先側ドライバの詳細化モデルを用いた場合と比較すると,PETが20[s]以上の等高線の形は良く似ているが,3[s]の等高線が発生していて,危険である事が分かる.

(8) 距離速度誤判断型 (X=100%)

距離速度誤判断型 (X=50%) の等高線と比較すると,ほぼ同じ等高線を描いている事が分かる.それに加えて,事故およびヒヤリ・ハットも同じ条件で発生している.非優先側ドライバの詳細化モデルを用いた場合と比較すると,PETが20[s]以上の等高線の形は良く似ているが,3[s]の等高線が発生していて,危険である事が分かる.

(9) 一時停止見落とし型

色の分布および等高線および事故発生条件は交差点見落とし型と同じである.見越し運転型と比較して,PETが3[s]以下を示す濃い赤色の領域が大きく拡大している事が分かる.そのため,ヒヤリ・ハットの発生件数が,見越し運転型と比べて多くなっている.非優先側ドライバの詳細化モデルを用いた場合と比較しても,安全である黄色や緑や青色の領域が少なく,危険である事が読み取れる.

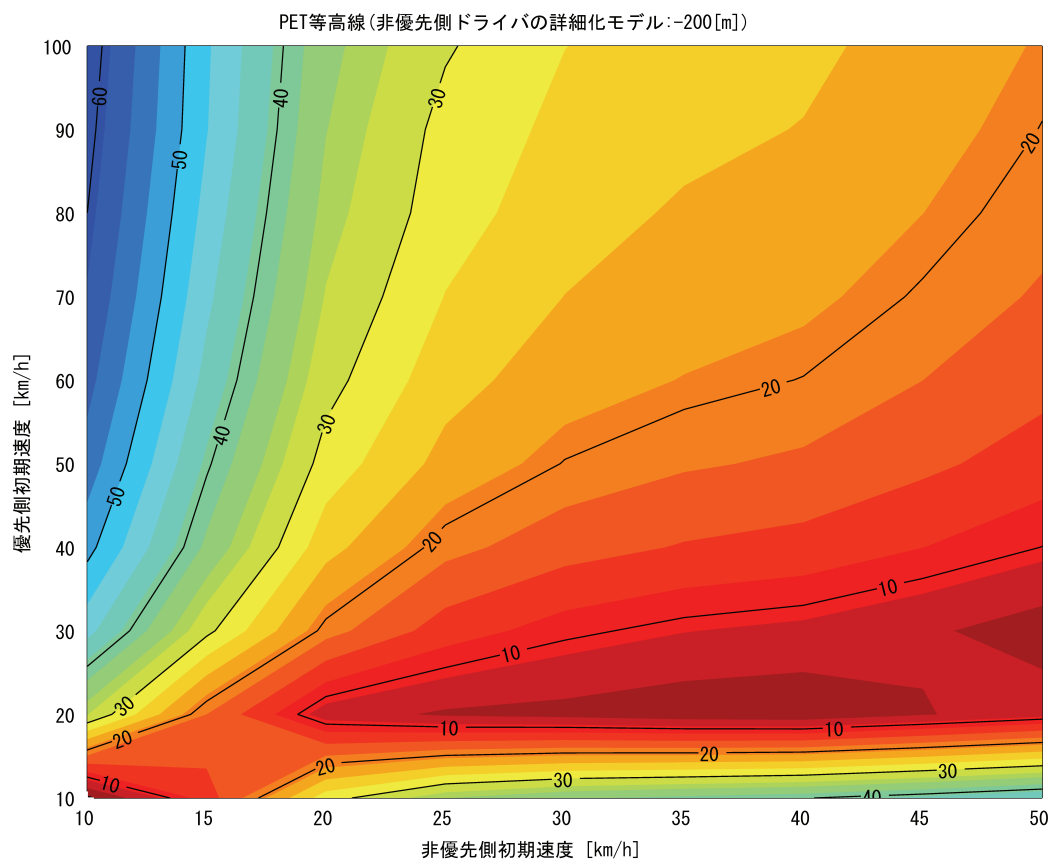


図 32 非優先側ドライバの詳細化モデルを用いた結果

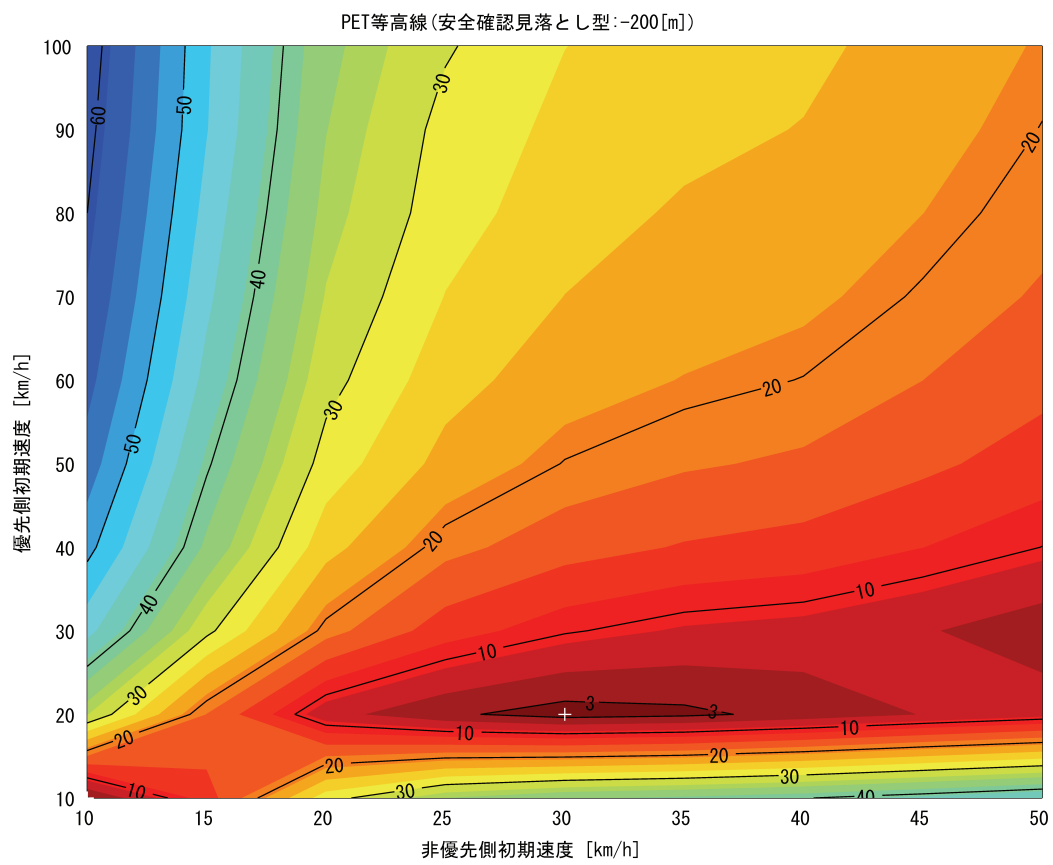


図 33 安全確認見落とし型の詳細化モデルを用いた結果

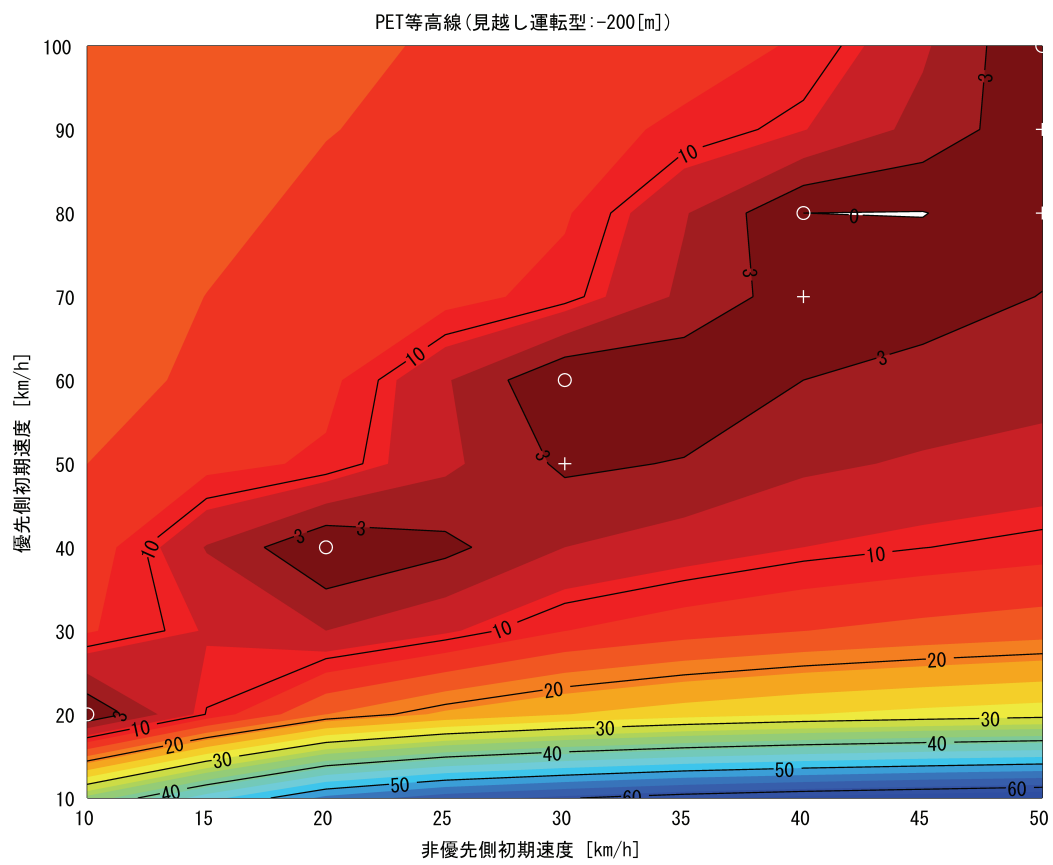


図 34 見越し運転型の詳細化モデルを用いた結果

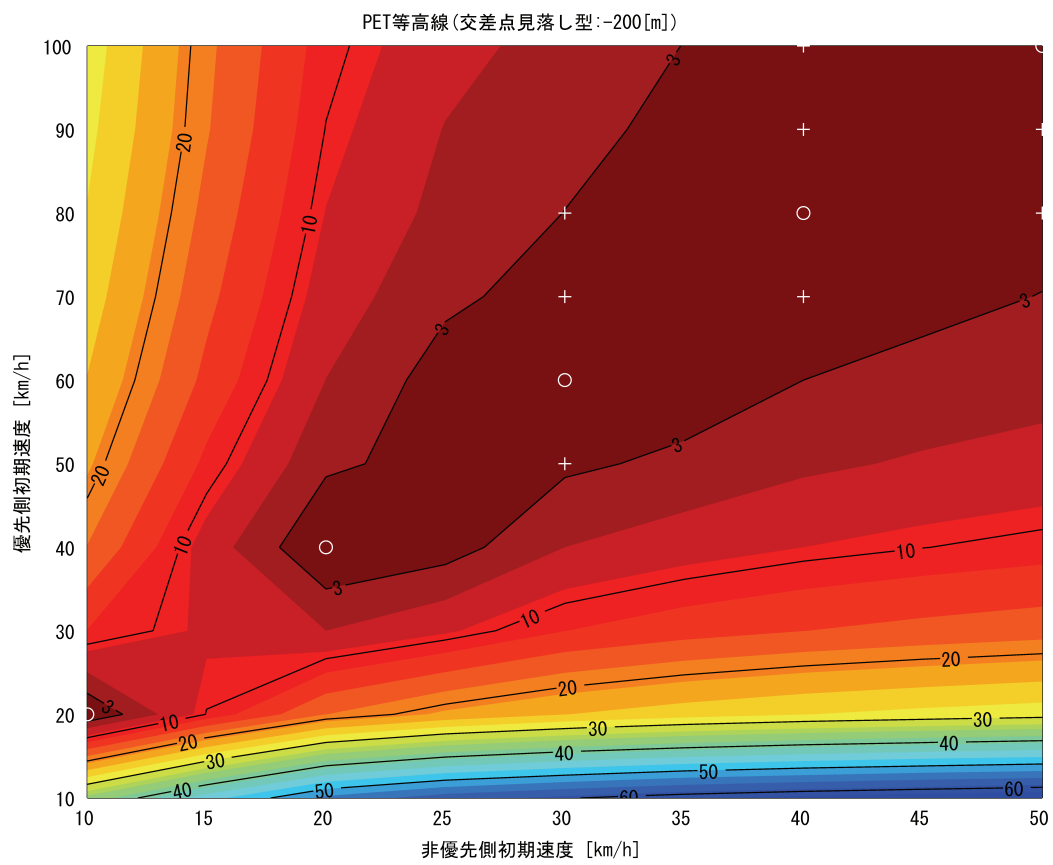


図 35 交差点見落とし型の詳細化モデルを用いた結果

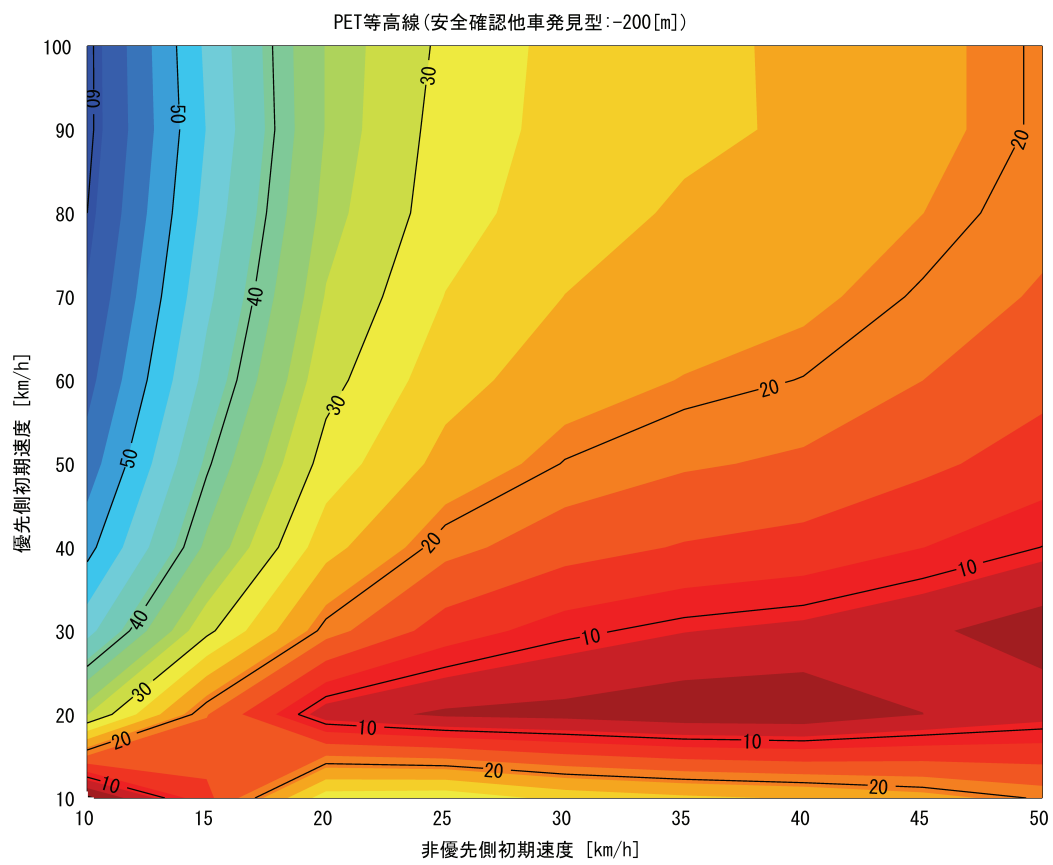


図 36 安全確認他車発見型の詳細化モデルを用いた結果

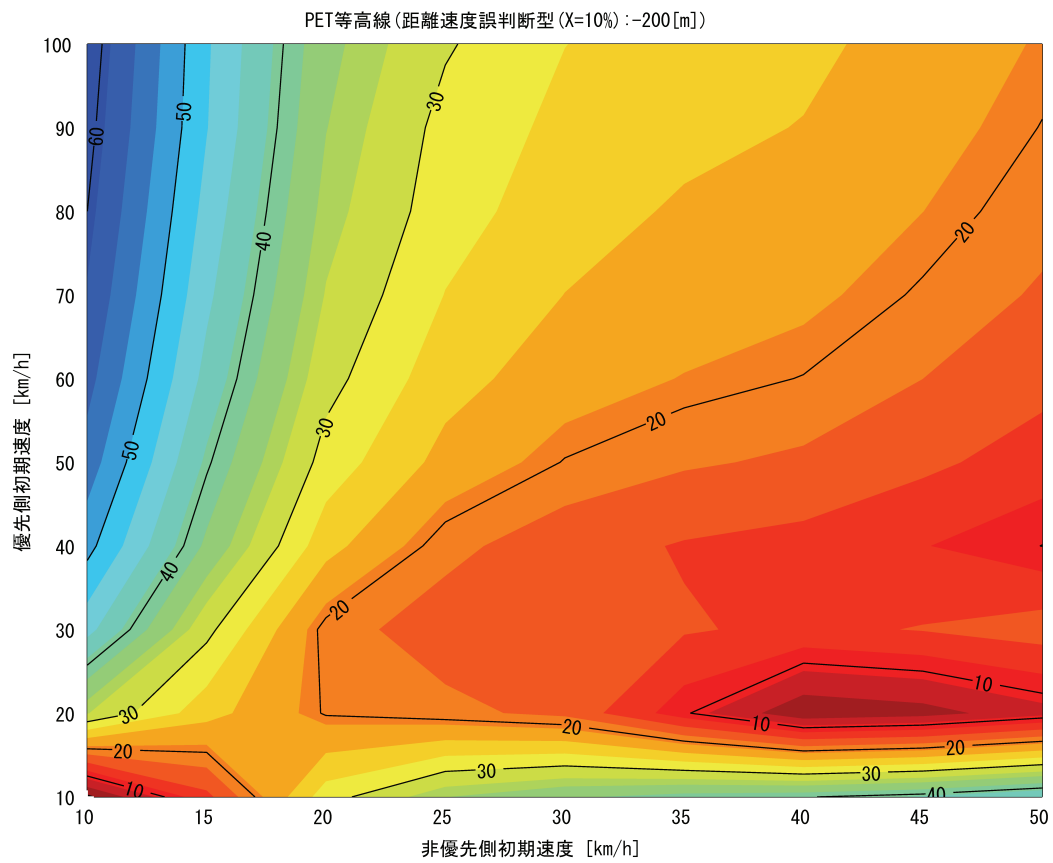


図 37 距離速度誤判断型 (X=10%) の詳細化モデルを用いた結果

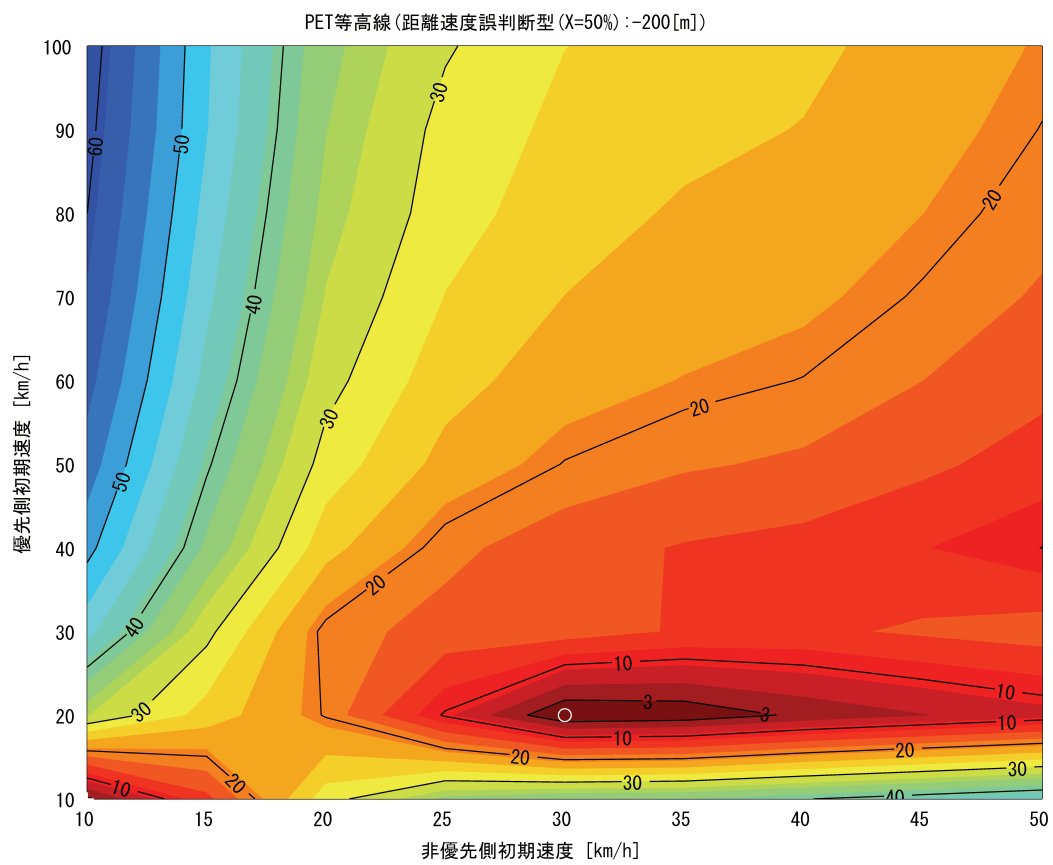


図 38 距離速度誤判断型 (X=50%) の詳細化モデルを用いた結果

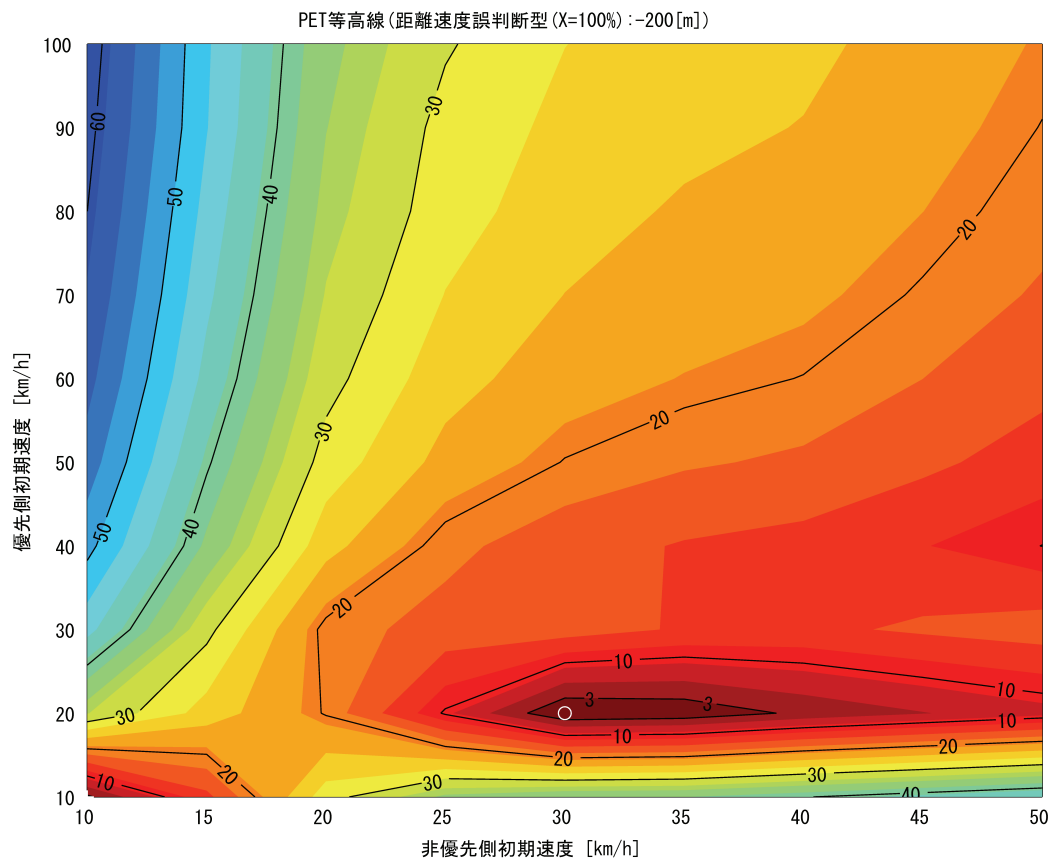


図 39 距離速度誤判断型 (X=100%) の詳細化モデルを用いた結果

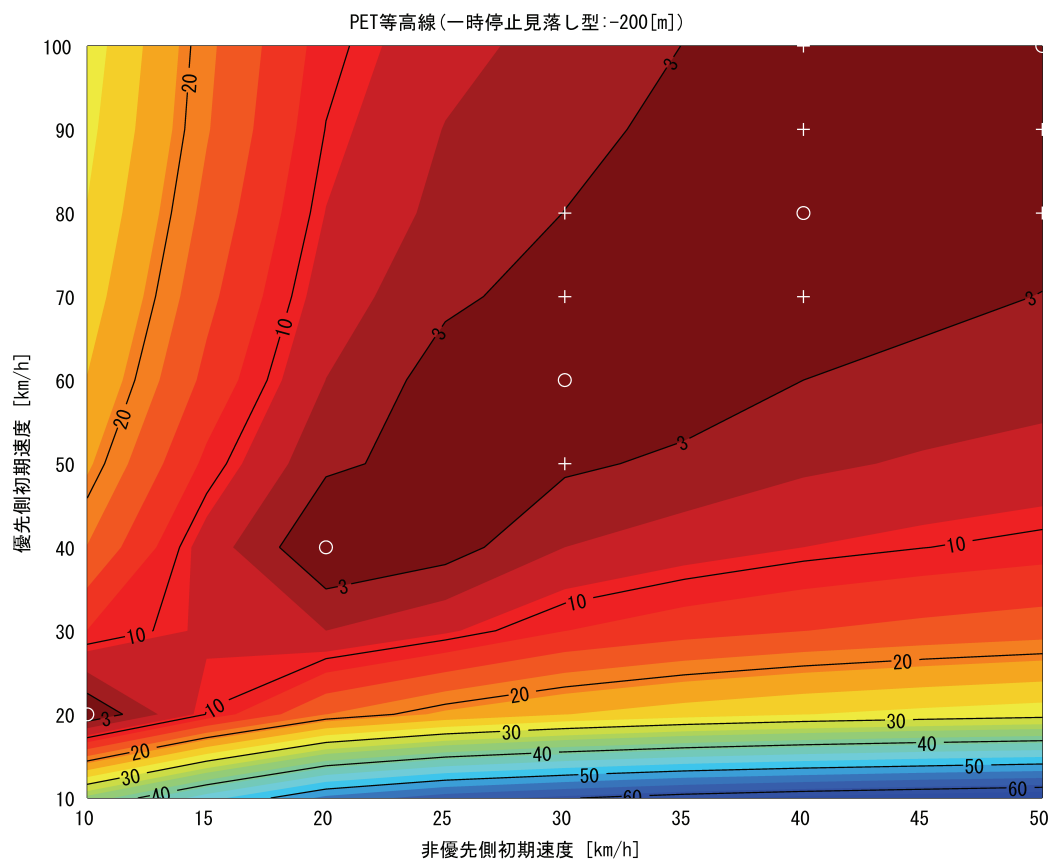


図 40 一時停止見落とし型の詳細化モデルを用いた結果

4.4 可視化手法のドライバ支援システムへの応用

前節では,各エラーパターンについて危険事象発生条件の可視化を行った.可視化を行った図は,非優先側車両の位置-100[m],優先側車両の位置 x [m]における,交差点での2車両の衝突可能性を示していると言える.このことを利用して,可視化手法を車車間通信を利用した支援システムへの応用を行う.

4.4.1 車車間通信を用いたドライバ支援システムの先行研究

車車間通信を用いた支援システムを実用化するための取り組みは現在活発に行われていて,既に公道での実証実験も行われている.車車間通信を用いた出会い頭事故防止の取り組みとしては,入谷らの研究 [21] がある.その中で,車車間通信でサービスエリア内の車に対して位置,速度等の細かな情報を互いに知らせ,衝突の予測計算をし,可能性があれば警告を出し,運転手が警告を無視すれば強制ブレーキをかけて事故を防ぐ方式について提案を行っている.このアルゴリズムは,優先側・非優先側の位置関係から衝突可能性を計算によって調べるという方式であるが,著者らも述べているように車両の大きさを考えていないなどの課題がある.

4.4.2 提案する支援システムの構成

支援システムは,地形データを提供するシステム,GPS,速度センサー,車車間通信システム,アラームシステムから構成される.全ての優先側車両と非優先側車両は,これらの装置を装備していることが前提である.

4.4.3 支援アルゴリズム

支援システムとしては,不要な警告は極力行わないシステムが望ましいので,提案する支援アルゴリズムは,そのような指針に沿って作成された.支援アルゴリズムは,危険事象発生条件の可視化を行った際に作成した図(以下,マップと呼ぶ)を用いる.支援アルゴリズムを次に示す

- ①車車間通信を行い, 優先側車両の位置と速度を取得する.
- ②非優先側の自車位置と自車速度を GPS や速度センサーから取得する.
- ③優先側車両および非優先側車両の GPS によるグローバルな位置データから交差点からの位置を計算する.
- ④優先車両の交差点からの位置・速度と非優先側車両の交差点からの位置・速度と地形データからシミュレーションを行い, マップを作成する.
- ⑤優先側車両の交差点からの位置, および非優先側車両の交差点からの位置から対応するマップを呼び出す.
- ⑥非優先側車両の速度と優先側車両の速度から, マップ上の PET 値を読み取る
- ⑦もし, 読み取った PET 値が 3 秒以下ならば, 危険であることをドライバにアラームで知らせる. PET 値が 3 秒以上ならば, アラームは鳴らさない.
- ⑧交差点に到達していなければ, 再び①に戻る.

4.5 まとめ

本章では, 前章で開発したシミュレーションプログラムに, 神田ら [6] が提案した, 出会い頭事故発生時のドライバの交差点進入直前の運転行動エラーパターンをモデル化し組み込むことで, 各エラーパターンの出会い頭事故に繋がる危険性の調査やエラー発生確率の推定や危険事象発生条件の可視化を行った. 出会い頭事故に繋がる危険性の調査やエラー確率の推定では, 以下のような事実を再確認することができた.

- 心身状態の低下によって引き起こされる認知・判断能力の低下が交差点や一時停止の見落としを招いた時, 出会い頭事故が起きやすい.
- ドライバが対向車両との距離や対向車両の速度を予測するとき, 真値から大きくずれればずれるほど出会い頭事故が起きやすくなる.
- 見越し運転は, 交差点や一時停止の見落としに匹敵するほど, 出会い頭事故が起きやすい.
- エラーの発生確率は, 事故に繋がりやすいエラーほど発生確率が低く, 逆に事故に繋がりにくいエラーほど発生確率が高い.

危険事象発生条件の可視化では, 以下のような事が分かった.

- シミュレーションで計算された PET 値を等高線や色で表現する事で, 危険事象の発生条件を可視化することができる.
- 等高線の特徴を比較することで, エラーパターンの危険事象発生条件の特徴をつかむ事が出来る.
- 可視化手法は, 車車間通信を利用したドライバ支援システムの支援アルゴリズムへの応用が可能である.

5. アラームシステムの評価

5.1 事故防止対策の検討

前章のシミュレーションの結果から, 神田ら [6] が定義した出会い頭事故発生時の非優先側ドライバーがとる典型的な6パターンのうち, エラーパターン3(交差点見落とし型)やエラーパターン6(一時停止見落とし型)が出会い頭事故に繋がる可能性が高い事が分かり, 事故に対する対策を優先的に取る必要がある事が分かった.

神田ら [6] は, 出会い頭事故発生時の非優先側ドライバーの交差点進入行動を分類しただけではなく, 分類した各パターンについての事故防止策について提案を行っている. その概念図を図 41 に示す.

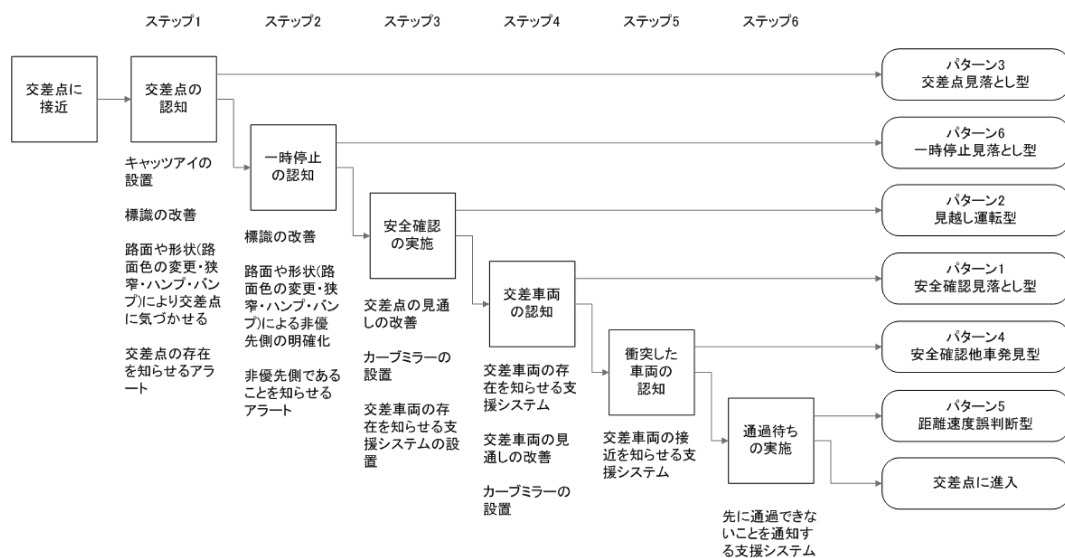


図 41 各エラーパターン別の事故対策

エラーパターン3(交差点見落とし型)では, キャッツアイの設置, 標識の改善, 路面や形状により交差点に気づかせる, 交差点の存在を知らせるアラートを行う, などの対策を挙げている. また, エラーパターン6(一時停止見落とし型)では, 標識の改善, 路面や形状による非優先の明確化, 非優先側であることを知らせるアラートを行う, などの対策を挙げている.

エラーパターン3(交差点見落とし型)およびエラーパターン6(一時停止見落とし型)のような事故では,心身状態の低下や初めての通行が原因として考えられる。それゆえ,事故防止対策としては,これらの原因の両方に共通して効果があると考えられるアラームシステムを採用するのが望ましい。特に,出会い頭事故に至るケースというのは心身状態が低下していて認知・判断能力に問題がある場合が多く,ドライバがアラームにすぐに反応できるかという問題もある。そこで,どのタイミングでドライバがアラームに気づき対応行動を取れば事故に至らないかをシミュレーションで検証することとした。

5.2 アラームシステムの構築と安全時間領域

5.2.1 アラームシステムの先行研究

アラームシステムとしては,危険が迫っている時は確実に警報を発し,危険が迫っている時以外には無駄な警告をしないシステムであることが求められる。そのようなアラームシステムとして,三谷ら[20]のものがある。警告手法としては,「ちょうど交差側車両が進入したときにこの車両を発見できる位置(発見位置)でドライバが急制動を行ったとして衝突を避けられない可能性があるかどうか」を調べるというものである。システムとしては,GPSや加速度センサーなどの動的情報と道路情報データベースなどの静的情報を組み合わせることを想定している。また,システムはドライバの空走時間や減速度が事前に分かっている事を前提としている。アルゴリズムは,まず交差点進入前に現在の速度や位置などの情報から,空走時間や減速度を用いて警告判定指標を計算する。次に,ドライバが停止できずに交差点に進入する可能性を,警告判定指標をしきい値と比較して判定し,衝突の可能性があれば警告を行うというものである。警告判定指標としては,停止必要加速度,停止位置余裕,停止必要余裕時間の3つの指標を挙げ,停止位置余裕距離が良好な警告効率をしていたと報告している。停止必要加速度,停止位置余裕距離,停止必要余裕時間の定義を次に示す。また,停止必要加速度,停止位置余裕距離,停止必要余裕時間の概念を図42に示す。また,発見位置と発見距離の定義を図43に示す。

停止必要加速度

判定位置において空走時間後にブレーキを開始したとして、衝突エリア位置でちょうど停止するために必要な一定加速度のことである。

停止位置余裕距離

判定地点において空走時間後に通常時のブレーキ加速度で制動を開始し、発見位置以降からは急制動で減速したとして、衝突エリア手前の何 m で停止可能かを推定した値 (停止位置余裕距離=衝突エリアまでの距離から停止距離を引いた値) である。

停止必要加速度

判定地点において衝突ラインでちょうど停止するために必要な減速行動を引き起こすまでの挙動を予測し、停止に必要な減速開始までの余裕時間のことである。

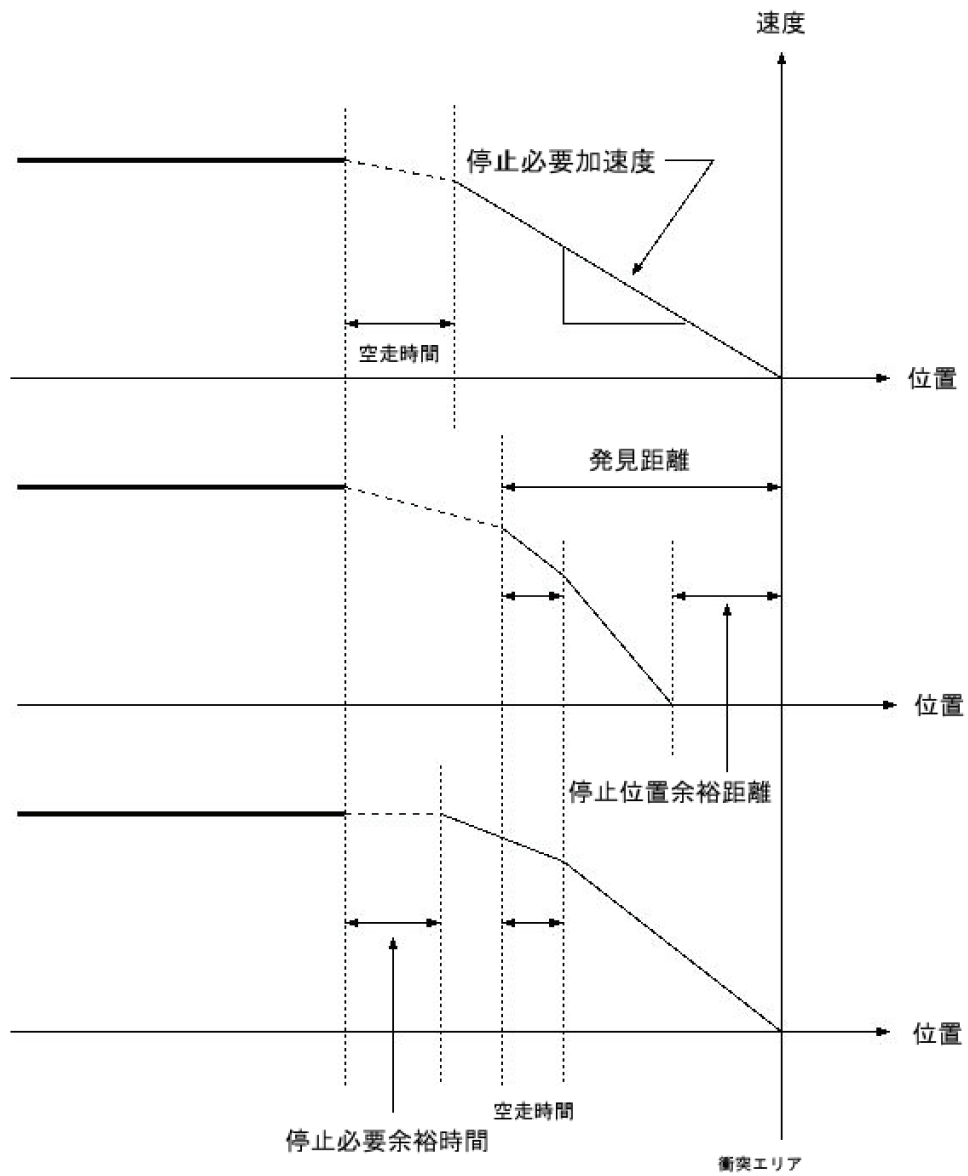


図 42 警告判定指標の概念

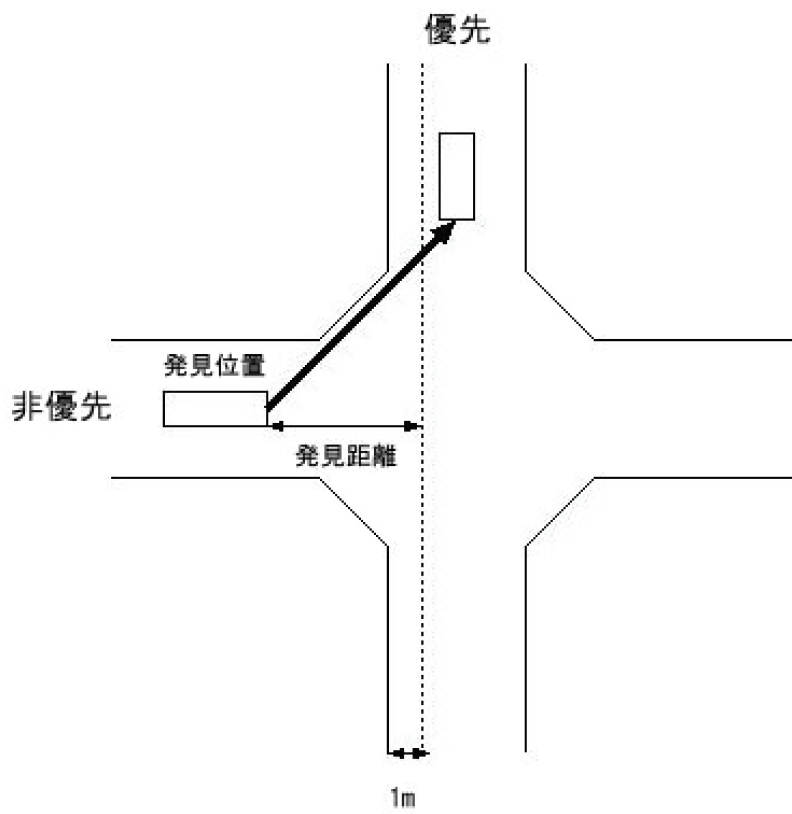


図 43 発見位置と発見距離の定義

5.2.2 アラームシステムの構築

三谷らの研究 [20] では, 発見位置での衝突可能性を判定しているが, ドライバに一時停止線で止まることを促すようなシステムではない. そこで, ドライバに一時停止線で止まることを促すようなアラームシステムを構築することとした. アラームシステムには, 次のような仮定を置く.

- 自車の位置・速度・加速度がセンサによって正確に取得できる.
- ドライバの空走時間や日常的な停止線への減速度や緊急時の減速度が分かっている.
- ドライバが, 一時停止線手前で日常的な運転行動を取るとした場合に予想される停止開始位置でアラームを鳴らす.

ドライバが運転時に一定の加速度で減速すると仮定すると, 現在の自動車の速度から空走時間と日常的な停止線への減速加速度から警報を鳴らすべき地点が計算できる. 現在の自動車の速度を v [m/s], 日常的な停止線への減速加速度を $-a$ [m/s²], 空走時間を t [s], 警報を鳴らすべき地点を一時停止線から D [m] とする. これらの関係を図 44 に示す.

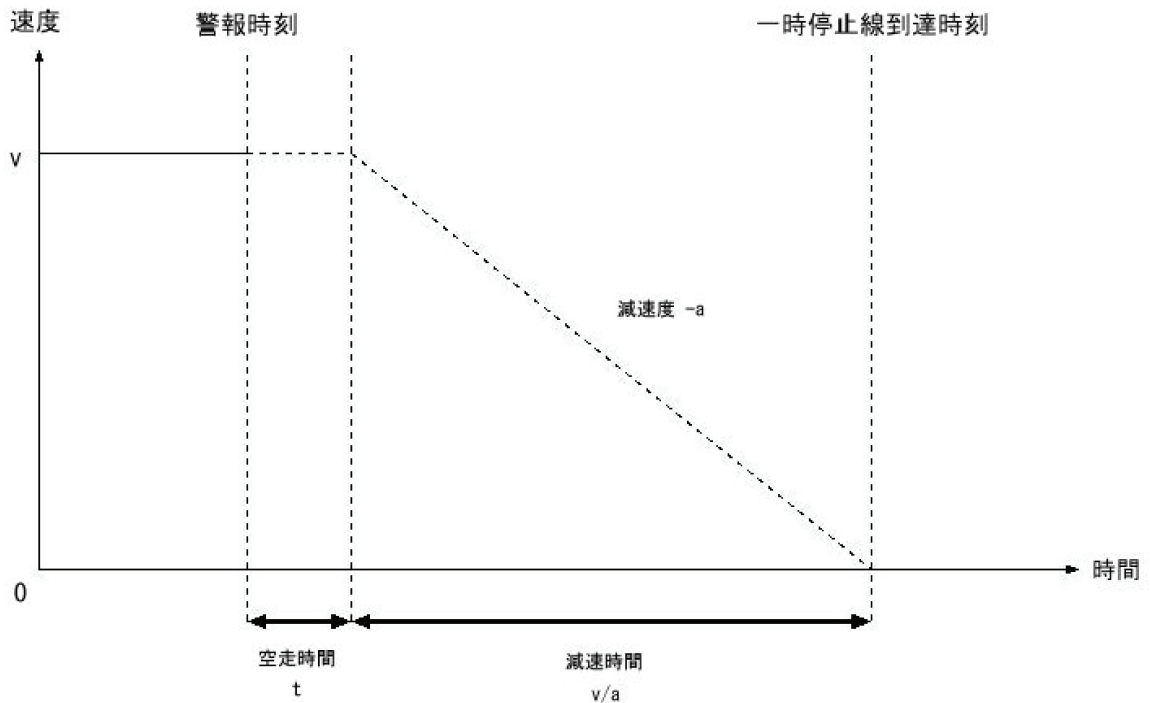


図 44 パラメータの関係図

そうすると、一時停止線からの警報発生距離 D [m] は次のように計算できる。

$$D = vt + \frac{v^2}{2a} \quad (4)$$

5.2.3 急ブレーキ操作と安全時間領域

ドライバは、アラームシステムが鳴って、急ブレーキを踏んで交差点入口で止まることができれば、4輪車や2輪車との事故を防ぐことが出来る。この、急ブレーキを踏んで交差点入口で止まることの出来る時刻を、警報限界時刻と呼ぶこととする。アラームシステムの警報発生時刻から警報限界時刻までの時間領域を安全時間領域と呼ぶことにする。安全時間領域の概念を図 45 に示す。

自動車の速度を v [m/s], ドライバの空走時間を t [s], ドライバの日常的な停止線への減速加速度を $-a_1$ [m/s²], ドライバの緊急時の減速加速度を $-a_2$ [m/s²], 交差点境界先端から一時停止線までの距離 D_1 [m] をとする. 交差点入口からアラームを鳴らすまでの距離 D_2 [m] は, 次式のように表される.

$$D_2 = D_1 + \left(vt + \frac{v^2}{2a_1} \right) \quad (5)$$

次に, ドライバが急ブレーキを踏んで交差点入口に止まるまでの距離 D_3 [m] は, 次式のように表すことができる.

$$D_3 = vt + \frac{v^2}{2a_2} \quad (6)$$

以上の式から, 安全時間領域 T [s] は次式によって計算することが出来る.

$$T = \frac{(D_2 - D_3)}{v} = \frac{D_1}{v} + \frac{1}{2} \frac{a_2 - a_1}{a_1 a_2} v \quad (7)$$

一時停止線から交差点入口までの距離は既知である. また, 緊急時の減速加速度は個人差は少ないと考えられる. そこで, 一時停止線から交差点境界までの距離を 7[m], ドライバの緊急時の減速加速度を 4[m/s²] とし, 自動車の速度 v [m/s] とドライバの日常的な停止線への減速度 $-a_1$ [m/s²] を様々に変化させ, 安全時間領域の変化を観察した. 結果を表 12-表 16 に示す.

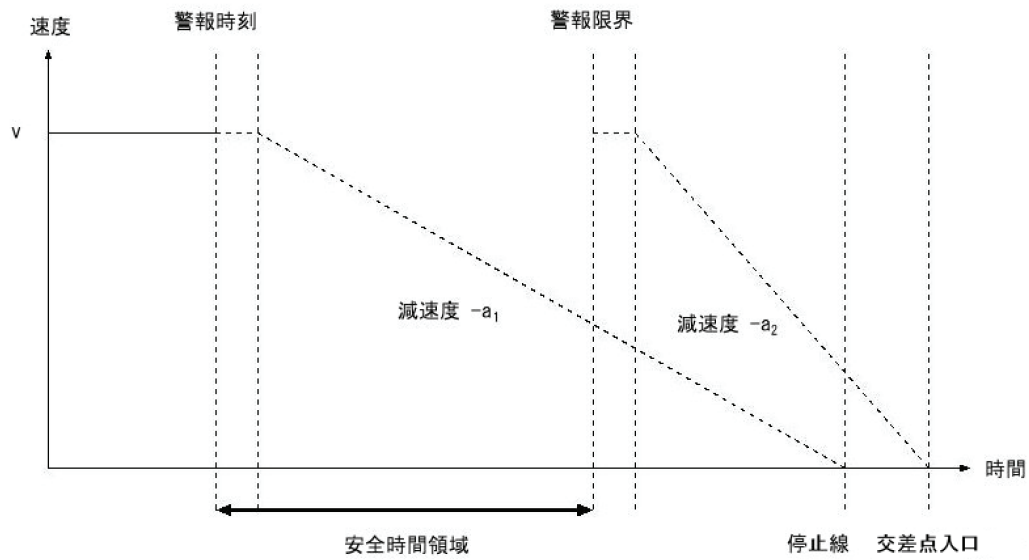


図 45 安全時間領域

表 12 初期速度 10km/h の時の安全時間領域の変化

初期速度 v [km/s]	緊急時の減速度 a_2 [m/s ²]	通常時の減速度 a_1 [m/s ²]	安全時間領域 T [s]
10	4	0.25	7.73
10	4	0.5	4.95
10	4	1	3.56
10	4	1.5	3.10
10	4	2	2.87
10	4	2.5	2.73
10	4	3	2.64
10	4	3.5	2.60

表 13 初期速度 20km/h の時の安全時間領域の変化

初期速度 v [km/s]	緊急時の減速度 a_2 [m/s ²]	通常時の減速度 a_1 [m/s ²]	安全時間領域 T [s]
20	4	0.25	11.67
20	4	0.5	6.12
20	4	1	3.34
20	4	1.5	2.41
20	4	2	1.95
20	4	2.5	1.67
20	4	3	1.49
20	4	3.5	1.36

表 14 初期速度 30km/h の時の安全時間領域の変化

初期速度 v [km/s]	緊急時の減速度 a_2 [m/s ²]	通常時の減速度 a_1 [m/s ²]	安全時間領域 T [s]
30	4	0.25	16.47
30	4	0.5	8.13
30	4	1	3.97
30	4	1.5	2.58
30	4	2	1.88
30	4	2.5	1.47
30	4	3	1.19
30	4	3.5	0.99

表 15 初期速度 40km/h の時の安全時間領域の変化

初期速度 v [km/s]	緊急時の減速度 a_2 [m/s ²]	通常時の減速度 a_1 [m/s ²]	安全時間領域 T [s]
40	4	0.25	21.46
40	4	0.5	10.35
40	4	1	4.80
40	4	1.5	2.94
40	4	2	2.01
40	4	2.5	1.46
40	4	3	1.09
40	4	3.5	0.83

表 16 初期速度 50km/h の時の安全時間領域の変化

初期速度 v [km/s]	緊急時の減速度 a_2 [m/s ²]	通常時の減速度 a_1 [m/s ²]	安全時間領域 T [s]
50	4	0.25	26.55
50	4	0.5	12.67
50	4	1	5.71
50	4	1.5	3.40
50	4	2	2.24
50	4	2.5	1.55
50	4	3	1.08
50	4	3.5	0.75

5.3 アラームに対する認知の遅れによる影響

前述の通り, エラーパターン 3(交差点見落とし型) やエラーパターン 6(一時停止見落とし型) のような出会い頭事故では, 心身状態が低下していて認知・判断能力に問題がある場合が多く, ドライバがアラームにすぐに反応できるかという問題がある. そこで, アラームの認知の遅れによって, 事故やヒヤリ・ハットがどれくらい増加するかシミュレータを用いて評価を行う. また, 安全時間領域と事故やヒヤリ・ハットの発生との関係についても調べる.

5.3.1 アラームに反応するドライバの詳細化モデル

アラームに反応するドライバの詳細化モデルを作成した. それを, 図 46 に示す. ドライバはアラームが鳴ると知覚をして, 停止の判断を行い, すぐに急ブレーキをかけると仮定する. その際, 空走時間がある. 停止後は, 2 章で作成した非優先側ドライバの詳細化モデルのうち, 交差点通過プロセスと同じ動作を行う.

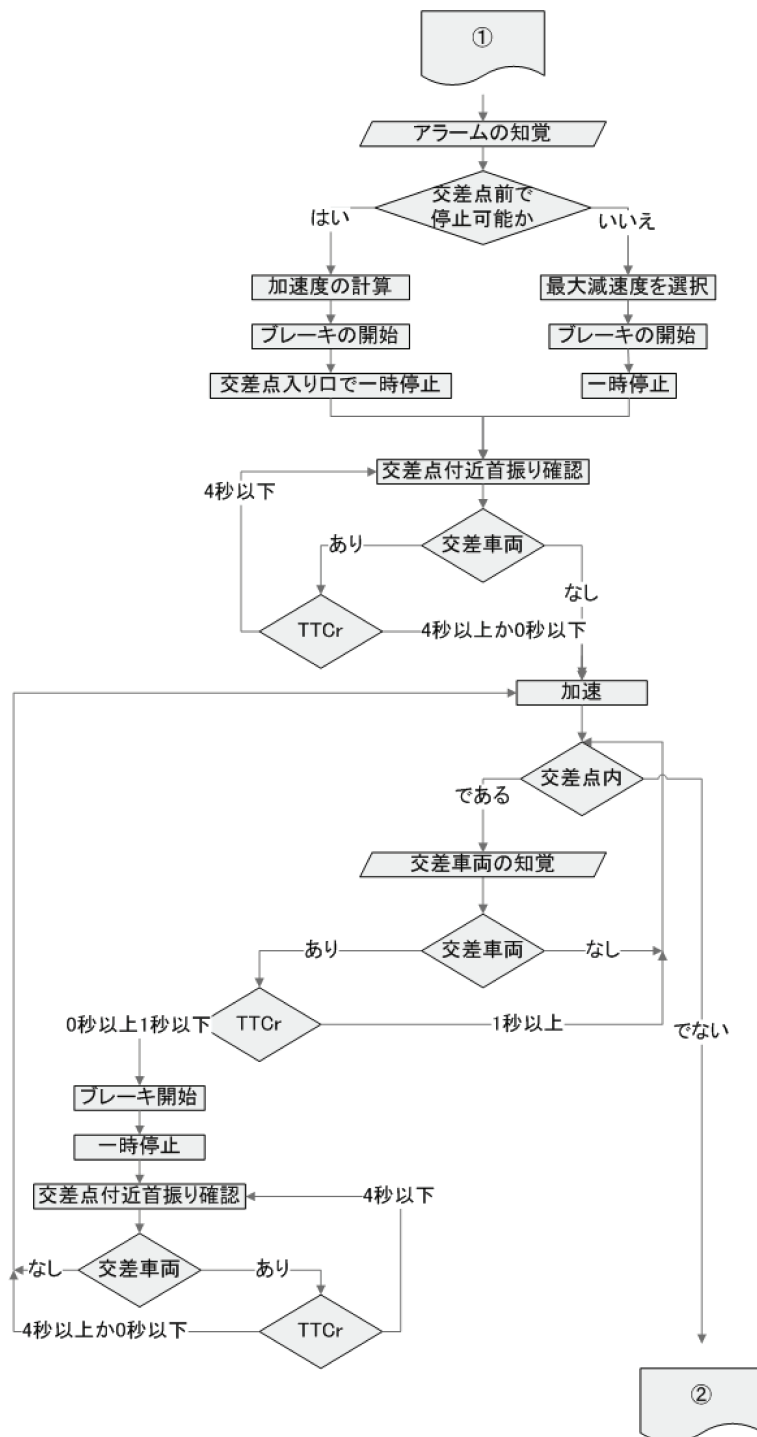


図 46 アラームに反応するドライバの詳細化モデル

5.3.2 出会い頭事故発生シミュレーション

アラームシステムのある場合とない場合を比較するため、アラームシステムのない場合のシミュレーションとアラームシステムのある場合のシミュレーションの両方を行った。アラームシステムが無い場合は、非優先側ドライバの詳細化モデル、エラーパターン3(交差点見落とし型)の詳細化モデル、エラーパターン6(一時停止見落とし型)の詳細化モデル、の3モデルを用いてシミュレーションを行った。アラームシステムがある場合は、アラームのある場合の詳細化モデルを使用し、アラームに対する反応遅れが、0秒、1.0秒、2.0秒、3.0秒、4.0秒、5.0秒の6パターンについてシミュレーションを行った。

5.3.3 シミュレーション条件

それぞれについて、非優先側ドライバが、初期速度10km/h,20km/h,30km/h,40km/h,50km/hで出発した場合の出会い頭事故発生シミュレーションを行った。シミュレーションに用いた交差点形状と交差点の座標の取り方は図13と同じである。非優先側車両の初期位置は-100m, 優先側車両の初期速度は10km/hから100km/hまでの10km/hおきの10通り, 初期位置は左側-20mから-200mまで20mおき, および右側20mから200mまで20mおきの合計20通りとした。シミュレーション条件の組合せは、非優先側の初期速度1つにつき200通りとなる。シミュレーションに用いたパラメータは、表17のとおりある。通常時の減速度 a_1 は $2[m/s^2]$, 緊急停止時の減速度 a_2 は $4[m/s^2]$ である。この場合の安全時間領域Tは、初期速度10km/hの時2.87[s], 初期速度20km/hの時1.95[s], 初期速度30km/hの時1.88[s], 初期速度40km/hの時2.01[s], 初期速度50km/hの時2.24[s]である。

表 17 ドライバのモデルパラメータ

パラメータ	設定値
ドライバの視距離	64m [16]
ドライバの中心視野角度	20° [17]
ドライバの視線の移動範囲	
横断歩道付近確認時	左右 5°
一時停止時	左右 45°
交差点通過判断時	左右 90°
ドライバの視線の各移動速度	62.5°/s
ドライバの知覚時間	160ms [18]-[19]
ドライバの判断時間	320ms [18]-[19]
ドライバの操作時間	80ms [18]-[19]
非優先側車両加速度	
アクセル開放による減速時	-1m/s ²
ブレーキ操作による減速時	-2m/s ²
緊急停止時	-4m/s ²
発進時	+2/m ²
非優先側車両速度	
徐行時	9km/h
交差点通過後	36km/h

5.3.4 シミュレーション結果と考察

アラームシステムのない場合の3モデルの結果と、アラームシステムのある場合の6パターンの結果を、合わせて表18に示す。表中、網掛けは安全時間領域内であったことを表している。

表 18 すべてのシミュレーション結果と考察

		非優先側速度									
		10km/h		20km/h		30km/h		40km/h		50km/h	
		事故	ヒヤリ	事故	ヒヤリ	事故	ヒヤリ	事故	ヒヤリ	事故	ヒヤリ
模範モデル		0	1	0	0	0	2	0	2	0	1
交差点見落とし型		4	1	6	9	7	32	10	54	20	59
一時見落とし型		4	1	6	9	7	32	10	54	20	59
遅れ	0	0	1	0	1	1	2	0	4	0	5
	1.0	0	1	0	3	0	5	0	5	1	6
	2.0	0	0	1	3	17	2	1	7	2	9
	3.0	0	0	5	10	4	36	10	54	16	60
	4.0	4	1	6	9	7	32	9	55	20	59
	5.0	4	1	6	9	7	32	10	54	20	59

反応遅れが、安全時間領域内に入った場合、パターン3(交差点見落とし型)やパターン6(一時停止見落とし型)と比べた場合、事故及びヒヤリ・ハットの件数が大幅に減った。これは、ドライバは交差点入り口で停止することができ、安全確認を行って交差点に進入しているからである。ただし、安全時間領域の中でも事故は発生している。

このメカニズムを探るため初期速度50km/h、反応遅れ1[s]のとき発生した1件の事故について解析した。図47に、車両位置と視野の時間変化を示す。このとき、優先側の初期速度40km/h、初期位置-200[m]であった。ドライバは、9.80[s]に交差点入口で停止し、そして安全確認をし11.24[s]に左90度方向を向いたが、優先側車両を確認することができず、14.12[s]に右90度方向、15.56[s]に正面を向いたが優先側車両を確認できず、そのため交差点に進入したが、17.60[s]に優先車両と衝突した。

まとめると、ドライバは交差点入口で停止することができたものの、悪い交通条件が重なり優先側車両を確認できず、交差点に進入し事故が起きていることが分かった。他の安全時間領域内で起きた3件の事故でも、同様の理由で事故が起きていることが分かった。以上をまとめると、アラームシステムで交差点入口で停止できたとしても、交通条件によっては事故に至る可能性はあるという事になる。

反応遅れが2.0[s]、初期速度30[km/h]の場合、パターン3(交差点見落とし型)やパターン6(一時停止見落とし型)と比べた場合、事故が増加している。事故の起こった事例を観察すると、ドライバは交差点内で停止し安全確認を行って事故にあっていることが分かった。このことから、安全時間領域外で停止した場合、かえって危険になる場合があることが分かる。

反応遅れが4.0[s]~5.0[s]の時、初期速度によらず事故及びヒヤリ・ハットの件数は、パターン3(交差点見落とし型)やパターン6(一時停止見落とし型)と比べた場合、ほぼ同じであった。これは、反応遅れが大きくなった場合、モデルはパターン3(交差点見落とし型)やパターン6(一時停止見落とし型)と異なるものの、交差点内で等速直進をとるという行動が同じになるため、発生件数がほぼ同じになったものと考えられる。

標準的なドライバはだいたい30km/h~50km/h前後で運転するが、その時の安全時間領域は2[s]前後である。居眠り等の心身状態が低下している状態から復帰し、安全に停止できる可能性がある。それでも対応できないドライバへの対策として、アラームが鳴って安全時間領域を超えてもまだ気づかない場合に、自動車に自動停止装置を組み込み交差点入口手前で強制的に急停止を行うといった、多段階の支援を行えばより効果的であると考えられる。

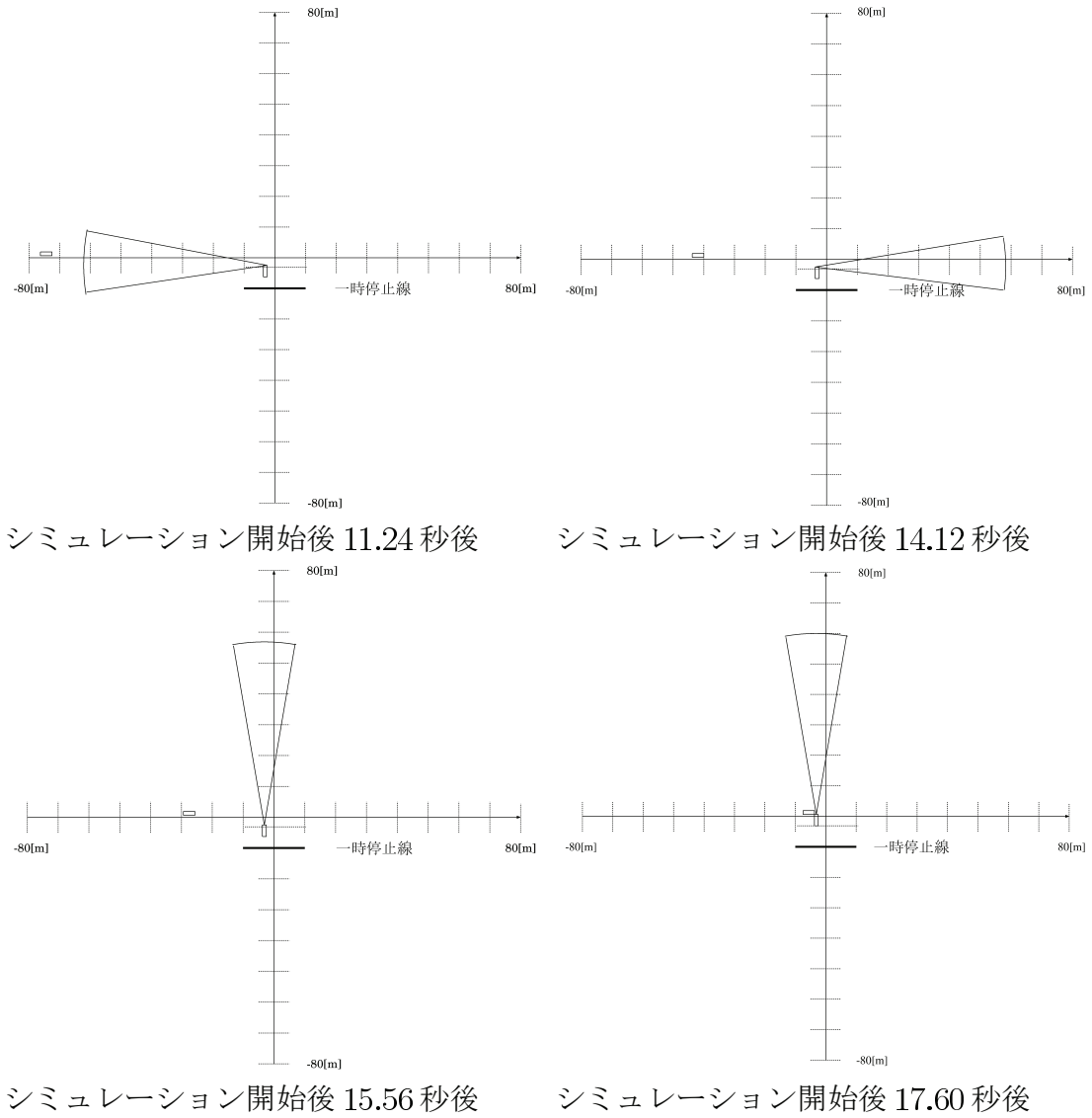


図 47 車両位置と視野の時間変化

5.4 まとめ

前章での交差点見落とし型や一時停止見落とし型のエラーパターンが危険であるという結果を受けて、これらの事故に対する対策について検討を行い、アラームシステムを構成した。そして、アラームが鳴ってからドライバが車両と衝突することなく安全に停車できる時間の範囲を示す指標として安全時間領域を提案した。

交差点や一時停止を見落とす原因としては、心身状態の低下による認知・判断能力に問題のある場合が多く、ドライバがアラームにすぐに反応できるかという問題がある。そこで、ドライバのアラームに対する認知の遅れによって、アラームシステムがない場合と比べて、事故やヒヤリ・ハットのどれくらい増加するかをシミュレータを用いて調べた。その結果、認知の遅れが安全時間領域内であった場合には、事故やヒヤリ・ハットの減少が確認できた。また、認知の遅れが安全時間領域外であった場合、事故件数が増加するケースがあり、かえって危険になる場合がある事が分かった。また、認知の遅れが大きくなると、交差点進入行動が等速直進となり、交差点見落とし型や一時停止見落とし型のエラーパターンと同じくらい危険であることが分かった。

安全時間領域については、以下のような考察が得られた。

- 標準的なドライバはだいたい 30km/h~50km/h 前後で運転するが、その時の安全時間領域は 2[s] 前後である。居眠り等の心身状態が低下している状態から復帰し、安全に停止できる可能性がある。
- それでも対応できないドライバへの対策として、アラームが鳴って安全時間領域を超えてもまだ気づかない場合に、自動車に自動停止装置を組み込み交差点入口手前で強制的に急停止を行うといった、多段階の支援を行えばより効果的であると考えられる。

6. 結論

本論文では、小坂ら [7] のタスクシーケンスによって表された模範的なドライバの交差点通過行動をベースに、いろいろなタイプのドライバの交差点通過行動を模擬するためのシミュレーションプログラムを開発した。その上で、開発したシミュレーションプログラムを使用して、不安全ドライバの事故発生メカニズムの解明や、エラーパターンの出会い頭事故に繋がる可能性の高さの調査や、出会い頭事故への対策についての考察を行った。

まず小坂ら [7] が提案した無信号交差点における模範的な非優先側ドライバのタスクシーケンスについて説明した後、模範的な非優先側ドライバの交差点通過行動をコンピュータシミュレーションを行うために、(1) 交差点通過プロセス、(2) 停止プロセス、(3) 交差点状況把握プロセス、(4) 交差点通過プロセスのそれぞれに対してモデル化を行った。定義したタスクシーケンスによって表された模範的な非優先側ドライバの交差点通過行動モデルをベースに、いろいろなタイプのドライバの交差点通過行動を模擬するためのシミュレーションプログラムを開発した。そして、実際にシミュレーションが交差点通過行動を模擬できる事を示し、一例として不安全な行動をとるドライバの危険性について考察を行った。

次に、開発したシミュレーションプログラムに、神田ら [6] が提案した、出会い頭事故発生時のドライバの交差点進入直前の運転行動パターンをモデル化し組み込むことで、危険事象発生条件の可視化とエラーパターンの出会い頭事故に繋がる危険性の調査を行い、心身状態の低下によって引き起こされる認知・判断能力の低下が交差点や一時停止の見落としを招き、それが危険事象発生に繋がりがやすい事を示した。また、交差点や一時停止を見落とす事によって生じる出会い頭事故の対策としてアラームシステムを構築し、ドライバの心身状態の低下によるアラームシステムへの反応の遅れに対する問題について検討を行った。その結果、ドライバはアラームが鳴ってから安全時間領域の範囲内にブレーキを踏むことができれば事故を減らせることが示された。

今後の課題としては、開発したシミュレーションプログラムの活用範囲を広げることが挙げられる。開発したシミュレーションプログラムは、モデルを拡張したりパラメータを変更するだけで、見通しの善し悪しが出会い頭事故に与える影響

の調査や、加齢による身体能力の衰えと出会い頭事故発生の関係の調査, などに応用することができる. 現在のシミュレーションモデルでは見通しの善し悪しについて一切考慮していないが, 見通しの善し悪しを考慮することで, より洗練されたシミュレーションモデルとなると考えられる. また, 現在ドライバのパラメータは1通りしか行っていないが, パラメータを様々に変化させることで, 若いドライバから高齢ドライバまで幅広くシミュレーションできると考えられる.

今後, 本研究で得られた知見が, 出会い頭事故を防ぐための安全運転教育や, 出会い頭事故防止支援装置などに活かされる事が期待される.

謝辞

主指導教官として多大なご指導を賜り,本研究を行う貴重な機会を与えてくださいました奈良先端科学技術大学院大学システム制御・管理講座の西谷紘一教授に深く感謝致します.

ご多忙の中,副指導教官になって頂き,研究に対する様々なご意見を頂きましたソフトウェア工学講座の松本健一教授に深く感謝致します.

本研究を進めるにあたり,研究活動全般について,多大なご指導,ご助言頂きました,システム制御・管理講座の野田賢准教授に深く感謝致します.

本研究を進めるにあたり,研究内容に関して,御助言を頂きました奈良工業高等専門学校の小坂洋明准教授に深く感謝致します.

リサーチミーティング等においてご助言を頂きましたシステム制御・管理講座の中村文一助教に深く感謝致します.

学校生活や研究生活を暖かく支えて下さったシステム制御・管理講座の入江由美秘書および青盛まどか前秘書に深く感謝致します.

研究をする上での資料やご助言を頂きました,豊田中央研究所の竹本雅憲氏に感謝致します.

公私にわたりお世話になったシステム制御・管理講座の皆様に深く感謝致します.

参考文献

- [1] 警察庁交通局, 平成 19 年中の交通事故発生状況
- [2] 警察庁交通局, 平成 18 年中の交通事故の発生状況
- [3] 橋川 拓也, 小坂 洋明, 西谷 紘一, 上地 正昭, 佐々木 和也: 自動車位置の時系列計測を用いた無信号交差点非優先側通過行動の分析, 自動車技術会自動車技術会秋季学術講演会前刷集, 128-07, 17-20 (2007)
- [4] 木村 賢治, 渡邊 一矢, 金森 等: 交差点における運転行動解析, 自動車技術会春期学術講演会前刷集, 16-03, 20035025 (2003)
- [5] 平松 真知子, 上野 裕史, 小原 英郎, 梅崎 建城: 無信号交差点における出会い頭事故の発生シナリオ, 日産技報, 54, 38-42 (2004)
- [6] 神田 直弥, 石田 敏郎: 出合頭事故における非優先側運転者の交差点進入行動の検討, 日本交通科学協議会誌, 1(1), 11-22 (2001)
- [7] 小坂 洋明, 東川 誠久, 森岡 俊之, 野田 賢, 西谷 紘一, 上地 正昭, 佐々木 和也: 非優先側運転者の交差点通過行動改善のための運転行動解析, 自動車技術会秋季学術講演会前刷集, 138-06, 11-16 (2006)
- [8] Liu X., Kosaka H., Noda M. and Nishitani H.: Model-based Dynamic Evaluation to Support the Design of Alarm Systems Part 1. Development of Virtual Subject, ヒューマンファクターズ, 11(2), 118-127 (2007)
- [9] Liu X., Kosaka H., Noda M. and Nishitani H.: Model-based Dynamic Evaluation to Support the Design of Alarm Systems Part 2. Case Study of a Boiler Plant Simulator, ヒューマンファクターズ, 11(2), 128-138 (2007)
- [10] Archer J. and Kosonen I.: THE POTENTIAL OF MICROSIMULATION MODELLING IN RELATION TO TRAFFIC SAFETY ASSESSMENT, ESS Conference Proceedings, Hamburg (2000)

- [11] Archer J.: DEVELOPING THE POTENTIAL MICRO-SIMULATION MODELLING FOR TRAFFIC SAFETY ASSESSMENT, ICTCT 2000 Traffic Safety Conference Proceedings, Corfu (2000)
- [12] Archer J.: DEVELOPING MICRO-SIMULATION FOR THE ASSESSMENT OF SAFETY IN RELATION TO INTELLIGENT SPEED ADAPTATION, 8th World Congress on ITS, Sydney (2001)
- [13] Kosonen I.: “HUTSIM . Urban Traffic Simulation and Control Model: Principles and Application.” Publication 100, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland (1999)
- [14] Treat J.R., Tumbas N.S., Mcdonald S.T., Shiner D., Hume R.D., Mayer R.E., Stansifer R.L. and Castellan N.J.: Tri-level study of the causes of traffic accidents. Report No.DOT-HS-0343-5-535-77(TAC), Indiana University (1977)
- [15] Allen B. L., Shin B.T. and Cooper P.J.: Analysis of Traffic Conflict Collisions. Transportation Research Record 667, TRB, National Research Council, Washington DC , 67-74 (1978)
- [16] 小林 正自, 上條 正義, 松浦 行洋: 実路における注視行動の解析, 自動車技術会秋季学術講演会前刷集, 84-04, 7-12 (2004)
- [17] 三浦 利章 : 行動と視覚的注意, 風間書房 (1996)
- [18] 松永 勝也 : 交通事故防止の人間科学, ナカニシヤ出版, 27 (2002)
- [19] Card S. K., Moran T. P. and Newell A.: The Psychology of Human-Computer Interaction, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey (1983)
- [20] 三谷 哲雄, 山中 英生: 無信号交差点における一時停止支援システムの警告判定法の開発, 第5回 ITS シンポジウム論文集, 391-398 (2006)

- [21] 入谷 忠光, 環 智和, 山中 英生: 車車間通信を用いた出会い頭と衝突等の事故防止方法, 電子情報通信学会技術研究報告. ITS, Vol.100, No.696, 111-116 (2001)

付録

研究業績

学術雑誌論文

小坂田 泰宏, 野田 賢, 西谷 紘一: 無信号交差点非優先側ドライバ通過行動シミュレーションプログラムの開発, ヒューマンファクターズ, 13(1), 14-22 (2008)

国内会議発表

小坂田 泰宏, 小坂 洋明, 野田 賢, 西谷 紘一: 危険事象発生時の心拍データの特徴, 第6回日本プラント・ヒューマンファクター学会, 8月1日, 慶應義塾大学 (2006)

小坂田 泰宏, 小坂 洋明, 野田 賢, 西谷 紘一: 危険事象発生時の心拍データの特徴, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2006 論文集 (DVD-ROM), 9月25日-9月28日, 倉敷アイビースクエア (2006)

小坂田 泰宏, 野田 賢, 西谷 紘一: 無信号交差点非優先側ドライバ通過行動シミュレーションプログラムの開発, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2008 論文集 (DVD-ROM), 9月1日-4日, 大阪大学 (2008)

小坂田 泰宏, 野田 賢, 西谷 紘一: 非優先側ドライバの交差点通過行動モデルを用いた出会い頭事故発生シミュレーション, 日本プラントヒューマンファクター学会ポスターセッション, 9月12日, 東京理科大学 (2008)