

経済産業省委託

平成29年度

「戦略的イノベーション創造プログラム（自動走行システム）：交通事故低減詳細効果見積もりのためのシミュレーション技術の開発及び実証」

調査報告書

平成30年3月

一般財団法人 日本自動車研究所

「戦略的イノベーション創造プログラム（自動走行システム）：
交通事故低減詳細効果見積もりのためのシミュレーション技術の開発及び実証」

－ 目 次 －

第 1 章	はじめに	I -1
1.1	開発目標	I -3
1.1.1	事業全体の目標	I -3
1.1.2	研究開発の目標	I -3
1.2	開発概要	I -4
1.2.1	全体開発概要	I -4
1.2.2	平成 29 年度の開発概要	I -7
第 2 章	交通事故低減詳細効果シミュレーション技術の開発	II -1
2.1	交通事故低減詳細効果シミュレーションの全体構造設計	II -1
2.1.1	シミュレーションの構造設計	II -1
2.1.2	シミュレーションで使用する道路構造設計	II -7
2.2	交通事故低減詳細効果シミュレーション本体機能の開発	II -12
2.2.1	シミュレーション管理モジュールの開発	II -12
2.2.2	車両エージェントモジュールの開発	II -15
2.2.3	歩行者エージェントモジュールの開発	II -29
2.2.4	道路管理モジュールの開発	II -33
2.2.5	ログ出力モジュールの開発	II -37
2.3	交通事故低減詳細効果シミュレーション周辺機能の開発	II -46
2.3.1	シミュレーション GUI 機能の開発	II -46
2.3.2	道路エディタの開発	II -53
2.4	交通事故低減詳細効果シミュレーションにおける事故再現技術の開発	II -71
2.4.1	交通環境再現型シミュレーション実行中に 事故再現させるための技術開発	II -71
2.4.2	正面衝突事故再現の開発	II -74
2.4.3	出会い頭の事故再現の開発	II -79
2.4.4	事故発生要因の検討	II -84
2.5	交通環境再現型シミュレーションの外部インタフェース考察	II -84
2.5.1	制御システム開発ツール（MATLAB/Simlink）等との連携	II -84
2.5.2	ドライビングシミュレータとの連携	II -85
2.5.3	外部システムとの連携のためのインタフェース	II -86
2.6	まとめ	II -90
第 3 章	交通参加者の行動モデルの構築	III -1

3.1	ドライバの行動モデルの構築	III-1
3.1.1	通常運転を模擬する行動モデルの開発	III-2
3.2	ドライバエラー・不安全状態の実装方法の構築	III-4
3.2.1	ドライバエラーの実装方法の検討	III-4
3.2.2	不安全状態の実装方法の検討	III-7
3.2.3	ドライバエラー・不安全状態の発生方法の検討	III-9
3.2.4	正面衝突場面・出会い頭場面に関する行動モデルの検討	III-11
3.3	他の交通参加者のモデル化に関する検討	III-13
3.4	交通参加者の行動モデル構築用のパラメータ取得のための調査・実験	III-16
3.4.1	実験環境と実験参加者	III-16
3.4.2	取得パラメータと各パラメータの定義	III-18
3.4.3	計測装置・方法	III-18
3.4.4	実験内容	III-20
3.4.5	実験結果	III-23
3.4.6	歩行者モデルパラメータの決定手法	III-27
3.4.7	実験結果の年齢別各パラメータ間の確率密度	III-27
3.4.8	歩行者モデルパラメータの妥当性の検証	III-30
3.4.9	歩行者モデルパラメータの検証のまとめ	III-32
3.5	まとめ	III-32
第4章	開発したシミュレーション技術の実証	IV-1
4.1	交通環境再現型シミュレーションによる事故低減詳細効果の 評価機能の確認	IV-1
4.2	シミュレーション技術の妥当性の確認	IV-7
4.2.1	交通参加者の行動モデルの検証	IV-8
4.2.2	事故シナリオの検証	IV-10
4.2.3	システム作動特性の定義方法の検証	IV-14
4.2.4	効果評価用のロジックの検証	IV-17
4.2.5	事故低減詳細効果の検証	IV-22
4.3	最終的な事故低減詳細効果の推計に向けた構想まとめ	IV-23
4.4	まとめ	IV-28
第5章	シミュレーション技術に関する国内外の最新動向調査	V-1
5.1	AdaptIVe	V-1
5.1.1	概要	V-1
5.1.2	AdaptIVeにおける自動走行機能の評価	V-2
5.1.3	AdaptIVe後継プロジェクトによる新たなデータ計測	V-4
5.1.4	本調査で得られた結果	V-4
5.2	国内動向調査	V-6

5.3	対外発表報告	V-17
5.4	まとめ	V-18
第6章	研究開発全体企画・管理	VI-1
6.1	全体工程表の策定	VI-1
6.2	開発検討会の運営	VI-2
6.2.1	開発検討会 委員名簿	VI-2
6.2.2	開発検討会	VI-4
第7章	まとめ	VII-1
7.1	成果まとめ	VII-1
7.2	今後の課題	VII-1

第1章 はじめに

自動車の発展はめざましく、現在の生活に不可欠なものとなっているが、普及に伴う交通事故や交通渋滞は、世界中で甚大な社会的損失をもたらしており、今後の世界的な人口増大に伴う自動車保有の増加や高齢化、都市の過密化の進展により、こうした問題も深刻さを増すものと考えられる。我が国において、自動車乗車中の交通死亡事故件数は、ここ数年減少幅が逡減し、引き続き厳しい状況が続いており、高齢者の自動車乗車中の交通死亡事故件数については、近年増加に転じている。また、渋滞の緩和、環境負荷の低減等への対応も急務となっている。既存の取り組みだけでは抜本的な解決が難しくなっていることを踏まえると、新たな取り組みである自動走行への期待は大きく、関連する市場の拡大も見込まれる。

「日本再興戦略」（平成27年6月30日閣議決定）等では、「安全・快適にヒト・モノの移動ができる社会像」等を目指し、自動走行システムの研究開発等を進めることとされている。

そこで、本事業では自動走行の早期の実用化・普及促進に向け、自動走行の導入による交通事故低減効果の見積もりに必要なシミュレーション技術の開発に取り組む。本技術によって自動走行の事故低減効果を定量的に示すことにより、自動走行の早期の実用化・普及促進に貢献する。

本報告書は、衝突被害軽減ブレーキなどの自動走行システム（運転支援をシステムに含む。以下同様）による交通事故低減効果の評価を可能とするシミュレーション技術の開発において、実施した内容を以下の通り纏めたものである。

（1）交通事故低減詳細効果シミュレーションの開発

平成29年度は、新たな事故場面として正面衝突と出会い頭事故の再現技術を開発し、これまでに開発した追従・追突、車線逸脱ならびに歩行者横断の事故場面も統合した交通環境再現可能なシミュレーション開発の目途付けを行った。また、新たに開発した自動走行システム（レベル4相当）を織り込み、ある前提条件での事故低減効果を算出することにより、その機能確認を行った。

（2）交通参加者の行動モデルの構築

平成29年度は、交通環境再現型シミュレーションに必要なドライバーの通常運転行動を模擬する行動モデルを構築した。さらに、事故に関連するドライバーの人的要因を模擬するため、通常運転行動モデルの枠組みに基づくドライバーのエラー・不安全状態の再現方法を検討・構築した。歩行者の行動モデルについては、平成28年度までに構築したモデルをベースに、歩行者横断行動特性パラメータの関連性と歩行者の属性（年齢・性別）による影響を実験によって把握し、より妥当なモデル開発に有用な特性データを取得した。

(3) 開発したシミュレーション技術の実証

平成29年度は交通環境再現型シミュレーションを開発し、手動走行をベースとして様々な自動走行システムが段階的に普及していくそれぞれの条件で事故低減効果を定量的に比較できることを確認した。さらに、算出した事故低減効果の妥当性の確認と全国規模の事故低減効果の推定のために必要なプロセスの提示と、各プロセスに必要な確認内容について具体化した。

(4) シミュレーション技術に関する国内外の最新動向調査

シミュレーション技術の動向調査を、AdaptIVeの最終成果報告会（平成29年6月28日および29日にドイツ、アーヘン市において行われた）に参加し実施した。

また、歩行者挙動のモデル化に関する動向、歩行者の交通事故の再現に焦点をあてた研究の動向、道路上の歩行者の行動に焦点をあてた研究の動向に関する論文調査を実施した。

1.1 開発目標

本事業全体の政策的な目標を 1.1.1 項に、また、そのために取り組むべき研究開発の目標を 1.1.2 項に示す。

1.1.1 事業全体の目標

「日本再興戦略」が目指す「交通事故・渋滞が劇的に減少し、距離や時間を意識させないコスト・スピードで物流サービスが提供される社会の実現」「究極的には交通事故のない社会の達成」および、「世界最先端 IT 国家創造宣言」等に掲げられた「2020 年を目処に交通事故死者数を 2,500 人以下とし、2030 年までには、世界で最も安全な道路交通社会を実現するとともに、交通渋滞を大幅に削減する」との目標の達成に向け、本事業では、自動走行の早期の実用化・普及促進に向け、自動走行の導入による交通事故低減詳細効果の見積もりに必要なシミュレーション技術の開発に取り組む。本技術によって自動走行の事故低減効果を定量的に示すことにより、上記目標の達成に貢献する。

1.1.2 研究開発の目標

被害軽減ブレーキや逸脱防止支援システムなどの先進運転支援システムも含め、自動走行システムによる交通事故低減詳細効果の評価を可能とするシミュレーション技術を実現することを目的として、以下を実施する。

(1) 交通事故低減詳細効果シミュレーションの開発

様々な車種、交通参加者、自動走行システムを織り込むことができ、また、実交通流を広域に再現させた中で自動走行システムによる事故低減効果を算出できるシミュレーション（以下、「交通事故低減詳細効果シミュレーション」という）を開発する。

(2) 交通参加者の行動モデルの構築

知覚・認知、判断、操作（挙動）に関する各交通参加者（ドライバや歩行者等）の行動モデルを実験等にて開発し、(1) で開発する交通事故低減詳細効果シミュレーションに実装する。

(3) 開発したシミュレーション技術の実証

(1) および (2) で開発した技術を用いて交通事故低減効果の評価を行うとともに、その評価が妥当であるかを確認するためのステップを定義する。そのステップ毎の妥当性検証を積み上げ、シミュレーション技術全体の妥当性を実証する。

1.2 開発概要

本事業全体（4年間）の開発概要と開発計画を1.2.1項に、また、これまでに開発した事故場面毎のシミュレーションをベースに、実交通環境を再現させるために実施した平成29年度の開発概要を1.2.2項に示す。

1.2.1 全体開発概要

(1) シミュレーション全体概念

交通事故を再現するシミュレーションは、大きく2つに分類される。1つ目は、ミクロ的な実事故発生場面のデータをもとに、個々の事故（限定された場所・時間）について当事者間の位置関係や速度をシナリオ通りに忠実に再現する「事故場面特化型」シミュレーションである。こちらは既に量産されている先進運転支援システム（Advanced Driver-Assistance Systems：以下、「ADAS」という）の製品開発に活用されている。2つ目は、マクロ的な観点により実交通流を広域に再現し、そこで発生する様々な事故（あらゆる場所・時間）を抽出する「交通環境再現型」シミュレーションである。本事業では、定常的な走行において危険な場面に至らせないという自動走行システムを導入した場合のマクロ的な事故低減効果を算出するために、後者の「交通環境再現型」シミュレーションの開発を狙いとする。

また、「交通環境再現型」シミュレーションにおいては、現実の交通現象をより忠実に再現するために、ドライバや歩行者などの交通参加者が、それぞれ知覚・認知・判断・操作の一連の行動を自律的に実施する主体（エージェント）となり、相互の行動に影響し合うマルチエージェント機能を織り込む必要がある。

本事業で開発するシミュレーションの概念を図 1.2.1-1 に示す。

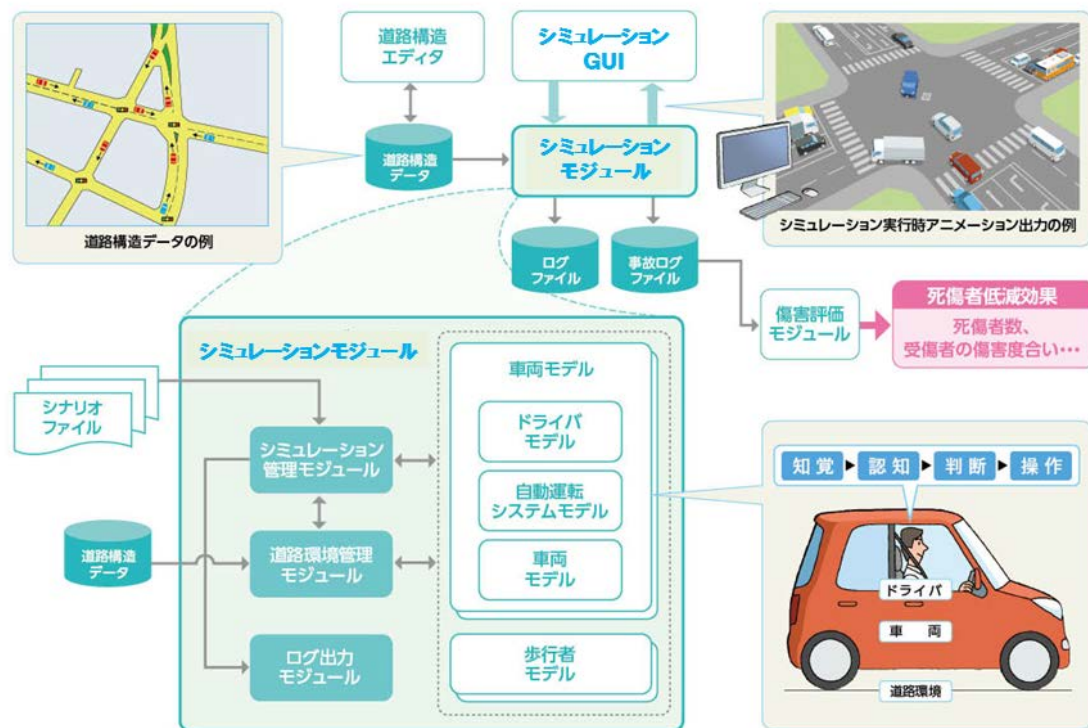


図 1.2.1-1 交通事故低減詳細効果評価のためのシミュレーション

(2) 全体開発計画

本事業は、図1.2.1-2の通り、4年間に渡り実施する計画となっている。平成27年度、平成28年度には、最終目的である交通環境再現型シミュレーション開発に向け、まずは、それぞれの事故場面毎の事故低減効果を評価するシミュレーションの開発を行った。平成29年度においては、それまでに開発した事故場面を統合し、交通環境を再現可能なシミュレーション開発の目途付けを行った。平成30年度は、交通環境再現型シミュレーションを完成させ、それにより算出された事故低減効果が妥当であることを確認する計画である。

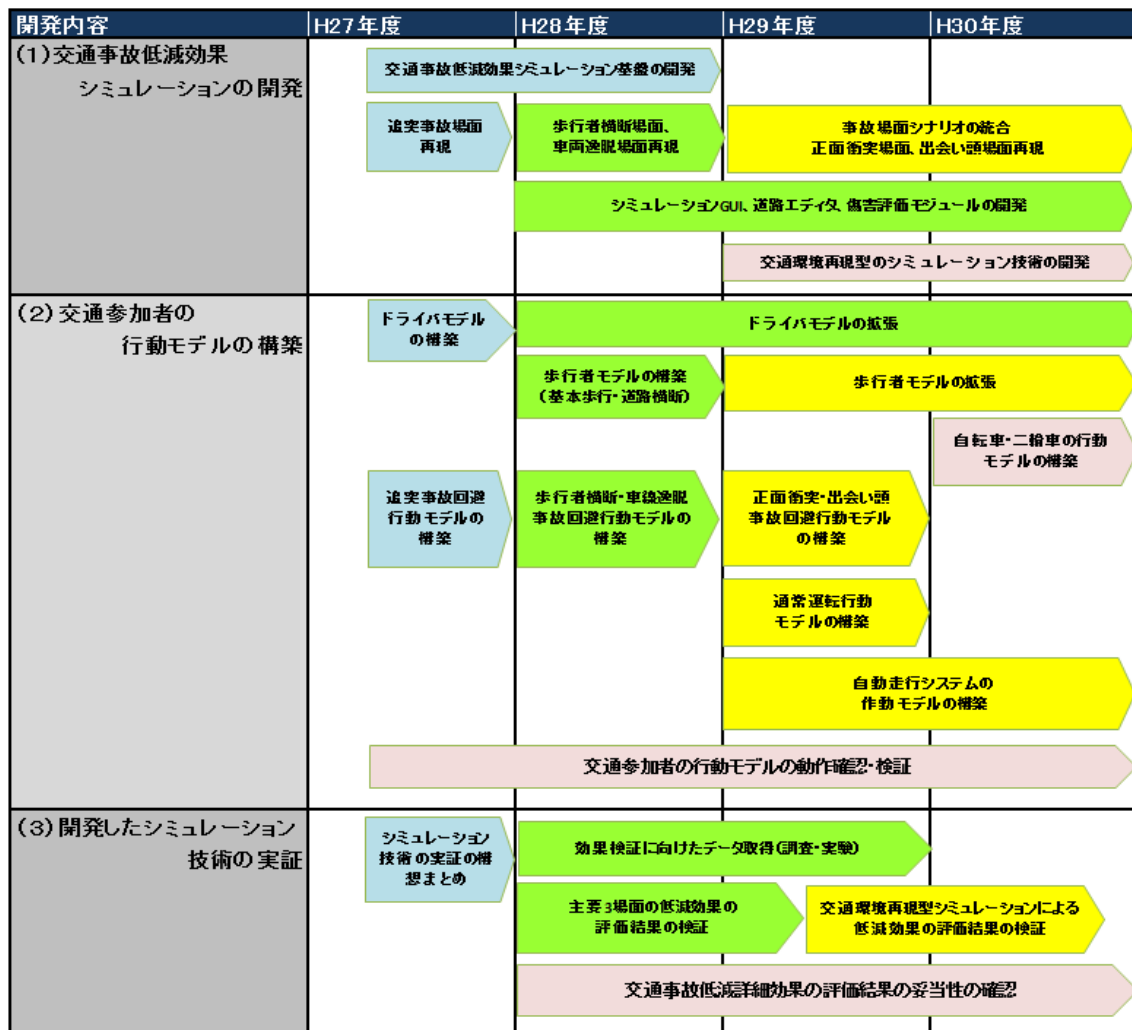


図 1.2.1-2 交通事故低減詳細効果評価のためのシミュレーション

次に、シミュレーション構成要素毎の開発計画を図1.2.1-3に示す。平成29年度は、新たな事故場面として、正面衝突と出会い頭を追加し、平成28年度までに開発した3つの事故場面も統合した交通環境再現可能なシミュレーション開発の目途付けを行った。また、歩行者モデルの機能拡張や自動走行システムのモデルを開発した。

	H27年度	H28年度	H29年度	H30年度
A_事故シーンのシナリオ *H25年の事故統計	追突事故+追従 単路 交通事故件数1位	逸脱事故+操舵 死亡事故率1位	歩行者横断事故+信号停止、停止線、歩行者 死亡事故件数1位	左記シナリオの統合 正面衝突 出会い頭 交通環境再現 事故渋滞
死亡事故発生割合	6%	20%	10% 13%	合計74%
B_ドライバモデル	【組み合わせ】 法遵守傾向×運転スキル ×情報処理能力×覚醒水準	脇見 居眠り 特性分布管理	認識行動 側/後方ミラー確認 (飲酒/病気)	OEM対応 インタフェース追加
C_交通参加者モデル		歩行者(基本機能)	歩行者(拡張機能)	自転車
D_車両モデル	等価二輪(操舵なし)	等価二輪(操舵あり)		自転車
E_運転支援システム	衝突警報/被害軽減ブレーキ	操舵回避支援システム 車線逸脱警報システム 逸脱防止支援システム	自動走行	OEM対応 インタフェース追加
F_シミュレーション基盤	シナリオ/実行/時間管理 統計/事故ログ出力	I/F標準化:各OEM対応 道路構造エディタ	システム 普及率設定	地図情報 コンバータ
G_環境	直線単路 昼 晴天	カーブ、複車線	交差点、信号	

図 1.2.1-3 シミュレーション構成要素の開発計画

1.2.2 平成 29 年度の開発概要

1.1.2 項で示した 3 つの「研究開発の目標」達成に向け、平成 29 年度は、平成 28 年度までに開発した事故場면을統合し、交通環境再現可能なシミュレーション開発の目途付けを行った。それぞれの目標に対する開発概要をそれぞれ (1) ~ (3) に示す。

(1) 交通事故低減詳細効果シミュレーションの開発

平成29年度は、平成28年度までに開発した3つの事故場面（追従・追突、車線逸脱、歩行者横断）に、新たな事故場面（正面衝突と出会い頭）を追加し、それらを統合した「交通環境再現型」シミュレーションの開発の目途付けを行った。また、現実の交通現象をより忠実に再現するために、ドライバや歩行者などの交通参加者が、それぞれ知覚・認知・判断・操作の一連の行動を自律的に実施する主体（エージェント）となり、相互の行動に影響し合うマルチエージェントの機能を織り込んだ。

その開発内容について、全体構造設計、交通参加者それぞれのエージェントモデルとこ

れらを管理（マルチエージェント機能）する本体機能、GUIなどの周辺機能、偶発的に事故を発生させる事故再現技術、ドライビングシミュレータ連携のためのインタフェース考察、ある前提条件での事故低減効果算出による機能確認に分けて、第2章にて詳細を報告する。

（2）交通参加者の行動モデルの構築

平成29年度は、平成28年度に開発された交通環境再現型シミュレーションの事故再現性能の向上を目指し、ドライバによる運転行動の模擬、歩行者行動の模擬を行う機能の整理と性能向上を行った。運転行動については情報処理プロセスの定義と、各プロセスの機能の検討、これを実現するための先行研究について調査を行った。歩行者行動の模擬については実験を行い、歩行者の年齢、性別等の属性ごとの横断傾向を調査した。

検討内容および実験内容、実験結果について第3章で詳細を報告する。

（3）開発したシミュレーション技術の実証

平成29年度に開発した交通環境再現型シミュレーションを用いて事故低減効果を試算し、手動走行をベースとして様々な自動走行システムが段階的に普及していくそれぞれの条件で事故低減効果を比較できることを確認した。さらに、最終的に全国規模の事故低減効果を推計するために必要なプロセスの提示と、各プロセスにおいて算出した結果の妥当性をどのような手順・方法で確認するのかを具体化した。

その検討内容について、交通環境再現型シミュレーションによる事故低減詳細効果の評価機能の確認、シミュレーション技術の妥当性確認、最終的な事故低減詳細効果の推計に向けた構想まとめに分けて、第4章で詳細を報告する。

第 2 章 交通事故低減詳細効果シミュレーションの開発

本章では、自動走行システム普及時の事故低減効果を算出するために必要な交通環境再現型シミュレーションの開発内容について述べる。はじめにシミュレーションの全体構成を 2.1 節で定義し、マルチエージェントを活用したシミュレーション本体機能の開発を 2.2 節、シミュレーションの周辺機能となる GUI、道路エディタの開発を 2.3 節、本シミュレーション上で実環境に合った事故を偶発的に発生させるための事故再現技術の開発を 2.4 節、本シミュレーションと外部システム (MATLAB/Simulink、ドライビングシミュレータ) との接続方法に関する検討内容を 2.5 節で示す。

本事業は、一般財団法人日本自動車研究所で実施した平成 28 年度経済産業省委託事業「戦略的イノベーション創造プログラム (自動走行システム): 交通事故低減詳細効果見積もりのためのシミュレーション技術の開発及び実証」²⁻¹⁾ (以下、「平成 28 年度事業」という) にて開発されたシミュレーションをベースに開発する。

2.1 交通事故低減詳細効果シミュレーションの全体構造設計

本節では、シミュレーションプログラムの全体構造 (2.1.1 項) と、地図データを取り込むためのシミュレーション用道路構造 (2.1.2 項) について述べる。

2.1.1 シミュレーションの構造設計

平成 29 年度に開発する交通環境再現型シミュレーションプログラム全体の構造として、

- (1) 交通環境の再現機能
- (2) 再現した交通環境の中で偶発的に事故を発生させる機能
- (3) 外部システムとのインタフェース機能

に分けて説明する。

開発にあたっては、平成 28 年度事業で開発した事故場面毎のシミュレーションを統合し、交通環境再現可能なシミュレーション開発の目途付けを目標とする。

交通環境再現型シミュレーションは、図 2.1.1-1 に示す要素から構成される。

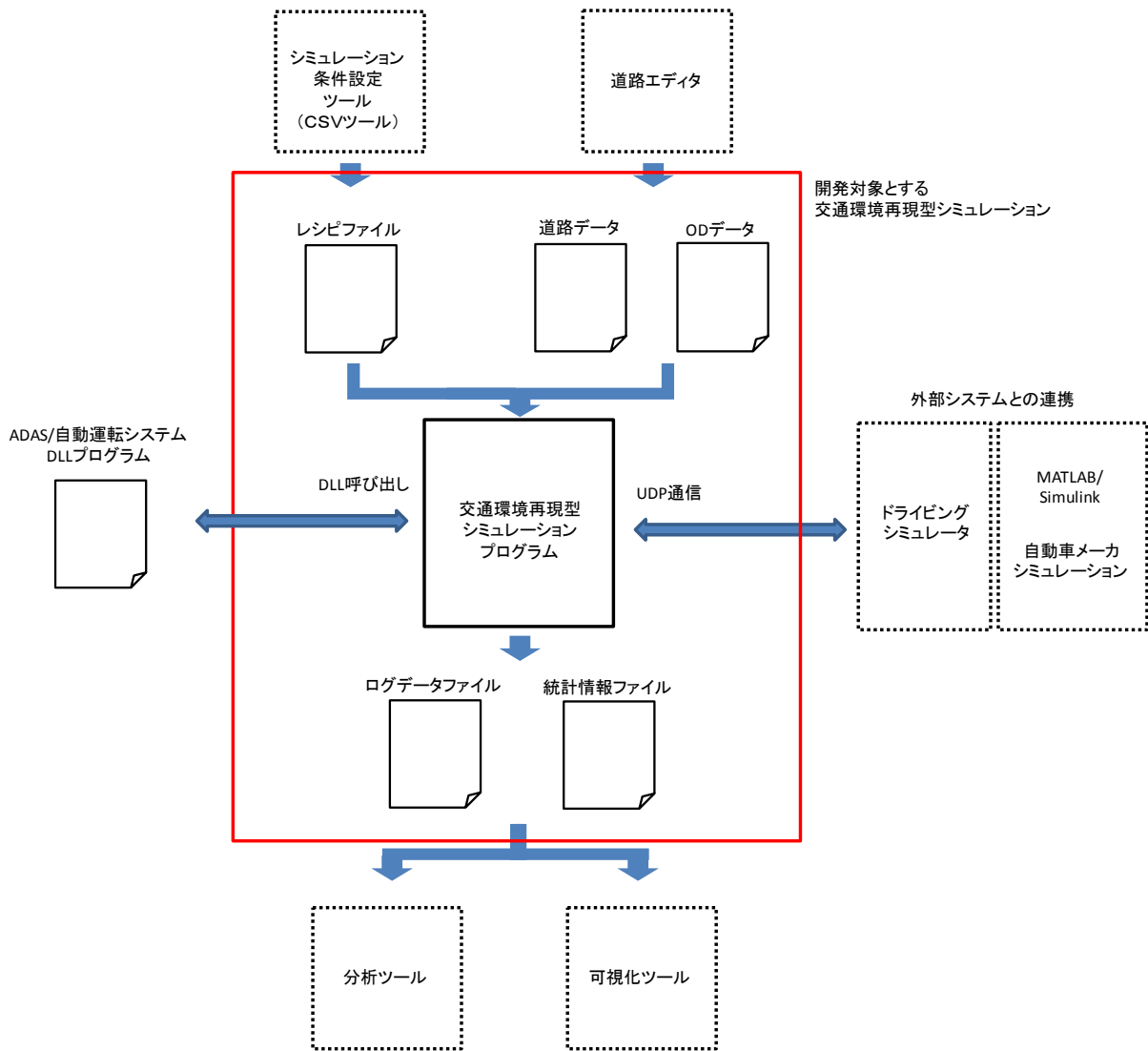


図 2.1.1-1 交通環境再現型シミュレーションの全体構成

シミュレーションの外部環境として、シミュレーション条件設定ツールや道路環境エディタ、分析ツールや可視化ツール等がある。

シミュレーションシステムの中核であるシミュレーションプログラムは、CSVツールや道路エディタが出力するレシピファイル、道路データファイル、OD^注データファイルを読み込んでシミュレーションを実行し、各種ログデータファイル、統計情報ファイルなどが出力できる。

注：ODとは、Oは起点（origin）、Dは終点（destination）を表し、交通参加者の出場退場地点を指す。

また、シミュレーションプログラムは、ネットワーク通信（TCP/UDP）やダイナミックリンクライブラリ（Dynamic Link Library：以下、「DLL」という）呼び出し、メモリ共有などの方法により、ドライビングシミュレータやMATLAB/Simulink、HILSなどの外部ツールとデータの授受を行い、連携してシミュレーションを実行できる。

次にシミュレーションプログラムの基本処理フローを図 2.1.1-2 に示す。
 交通環境再現型シミュレーションを行う場合、事故場面特化型シミュレーションを行う場合、さらに外部ツール連携を行う場合でも、基本フローは同じである。目的に応じて、読み込むファイルや、処理フローを変更することで機能を実現させることができる。

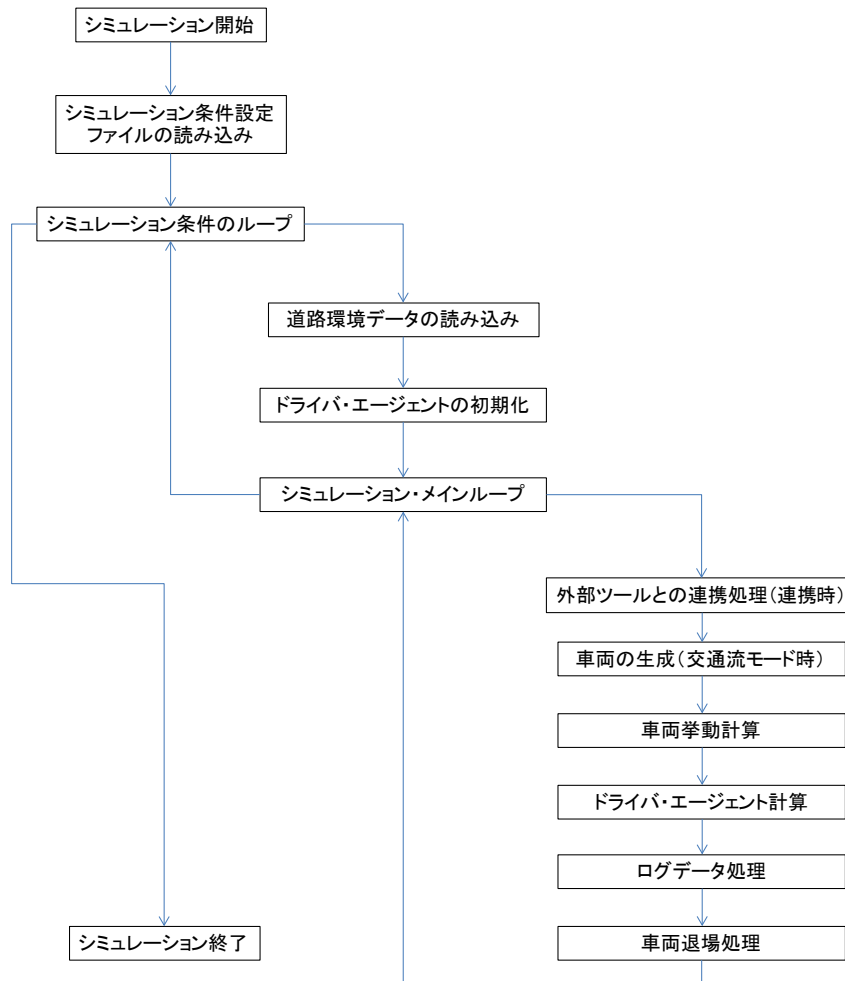


図 2.1.1-2 交通事故低減詳細効果シミュレーションの基本処理フロー

(1) 交通環境の再現機能

ユーザが指定した道路情報を対象として、シミュレーションの中で、交通量や旅行時間などの交通特性を再現する。また、交通環境再現の中で、ドライバーに起因した交通事故を発生させる。さらに、指定した任意の車両に、自動走行システムや ADAS のロジックを実装し、事故件数を集計することにより、事故低減を効果を算出することができる。また、事故・ヒヤリハットに至るまでの経緯データも出力することにより自動走行システムや ADAS の効果を算出することができる。

交通環境再現型シミュレーションにおける車両挙動の決定は、実際のドライバーが行っている運転中の知覚・認知・判断・操作を模擬するドライバーエージェントにより行う。ドライバーエージェントは図 2.1.1-3 に示すように、周囲から情報を取得する機能と、運転行動の

目標を決定する機能、車両を操作する機能、ならびに、それら機能間を連携させるための記憶機能を有する。

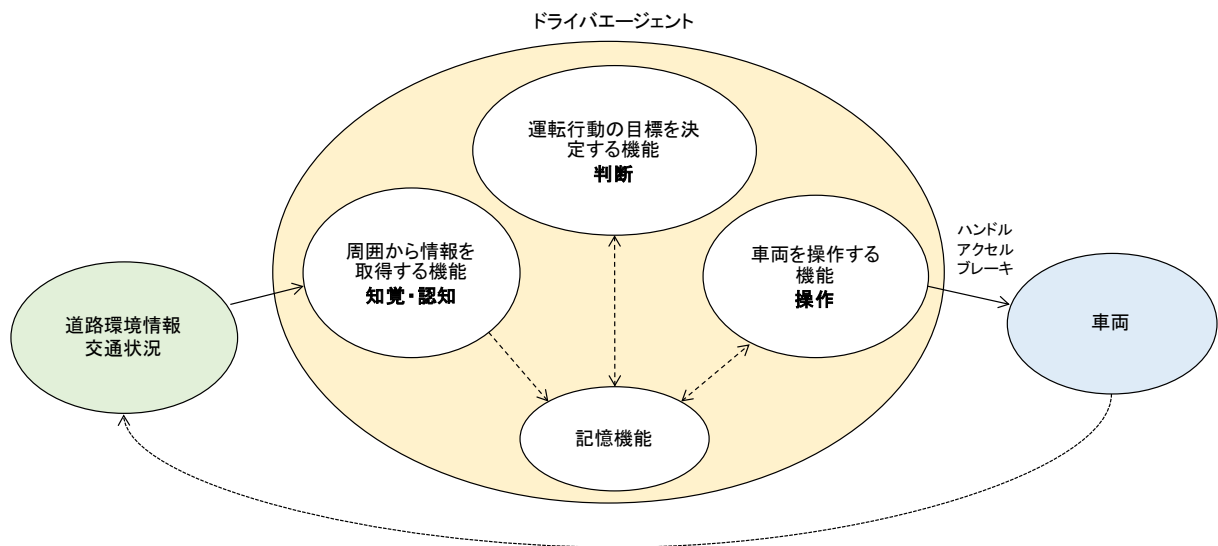


図 2.1.1-3 ドライバエージェントの各行動に関する機能要件

また、交通環境を再現するため、複数のドライバーエージェントが、それぞれの車両を運転し、それらが相互に作用し合うマルチエージェント方式を採用する。

実際のドライバは、脇見をしたり、スマートフォンを操作したりするなどの運転以外の行動や、疲労や体調不良、あるいは他のものに気を取られたりして注意力散漫となる。このようなことが、危険な状態を引き起こし、それに気が付かず、適切な回避行動を行わないと事故が発生する。このような行動をドライバーエージェントで模擬することが必要である。

(2) 事故場面再現機能

交通環境を再現する中で事故場면을再現するためには、ドライバーエージェントが(1)で示したような挙動を模擬する必要があるが、ドライバーエージェントは単なるプログラム(ロジック)であり、疲労や体調不良を同じように模擬できない。あくまでも模擬するのは、抽象化したレベルでのドライバの行動ならびにその状態変化となる。たとえば、脇見をするということは、抽象化されたレベルでは「運転に必要な周辺環境の情報が入ってこない」ことに相当する。漫然運転においても、抽象化されたレベルでは、脇見と同じく、「運転に必要な周辺環境の情報が入ってこない」に相当する。このように、抽象化したレベルで、ドライバエラー(交通事故の原因となるドライバの運転行動)を捉えて、ドライバーエージェントの3つの各機能において、表 2.1.1-1 に示すエラー要因を実装する。

表 2.1.1-1 ドライバエージェントに実装するエラー要因

ドライバエージェントの機能	エラー要因
周囲から情報を取得する機能	<ul style="list-style-type: none"> ・運転に必要な周辺環境の情報が入ってこない ・他交通参加者の相対位置ならびに相対速度が不正確 ・他交通参加者の情報が、記憶領域から消え去る
運転行動の目標や目標値を決定する機能	<ul style="list-style-type: none"> ・安全確認処理をスキップする ・安全確認の結果、危険と判定していたものを、安全に上書きする
車両を操作する機能	<ul style="list-style-type: none"> ・アクセルとブレーキの踏み間違い ・ハンドル操舵角が不適切に固定される

これらのエラー要因は、前述の通り、実際には様々な原因によって発生するものである。そのメカニズムなどは研究対象であり、現時点で明確になっていないものもあることから、随時、研究成果を反映できるようにする。具体的には、今後の研究成果の反映によって変更していくものは、すでに実装済みのエラー要因の条件付き発生確率である。従って、交通環境再現型シミュレーションの機能要件として、ドライバエージェントのエラー要因の発生タイミングを決定するロジックについて、カスタマイズできることが必要である。また、これらのロジックのパラメータを交通環境再現型シミュレーションのユーザが変更できるように、外部ファイルにパラメータの値をストアし、それを読み込んで使用できる機能を実装する。

(3) 外部システムとのインタフェース連携機能

シミュレーションで使用している制御ロジックを置き換える方法として、DLL 呼び出しによる制御方法の変更を検討する。外部システムをシミュレーション中の車両 1 台のみ置き換える場合は、インタフェースによる連帯機能の可能性を検討する。

① 制御ロジックのカスタマイズ

各自動車メーカーの自動走行システムによる事故低減効果を算出するために、各社の制御アルゴリズムをシミュレーションに織り込めるように制御ロジックをカスタマイズする方法として、DLL を用いた独自関数の呼び出しを行えるようにする。DLL で呼び出せる関数は、以下に示す 2 つとする。

(i) 初期化関数

シミュレーション開始前に一度だけ呼び出される。DLL 内の変数初期化や、DLL 側での設定ファイルの読み込みなどの処理を実装する。

(ii) 制御ロジック関数

シミュレーションの計算サイクルごとに呼び出される。戻り値はなく、引数に自車両のID番号、自車周辺の車両や交通参加者の位置および速度といった周辺の交通参加者情報、それから制御ロジックの計算結果である制御コマンドを格納する変数を設定して使用する。図 2.1.1-4 に、DLL 呼び出しによる制御ロジックのカスタマイズの概略を示す。

制御コマンドは、アクセル操作量、ブレーキ操作量、ハンドル操作量、ドライバへの警報情報の4つとして、車両状態の更新時にこれらの情報を使用するようにする。ドライバへの警報情報は、それが与えられたときに、ドライバエラーが発生していたら、エラー発生を解除するものとする。

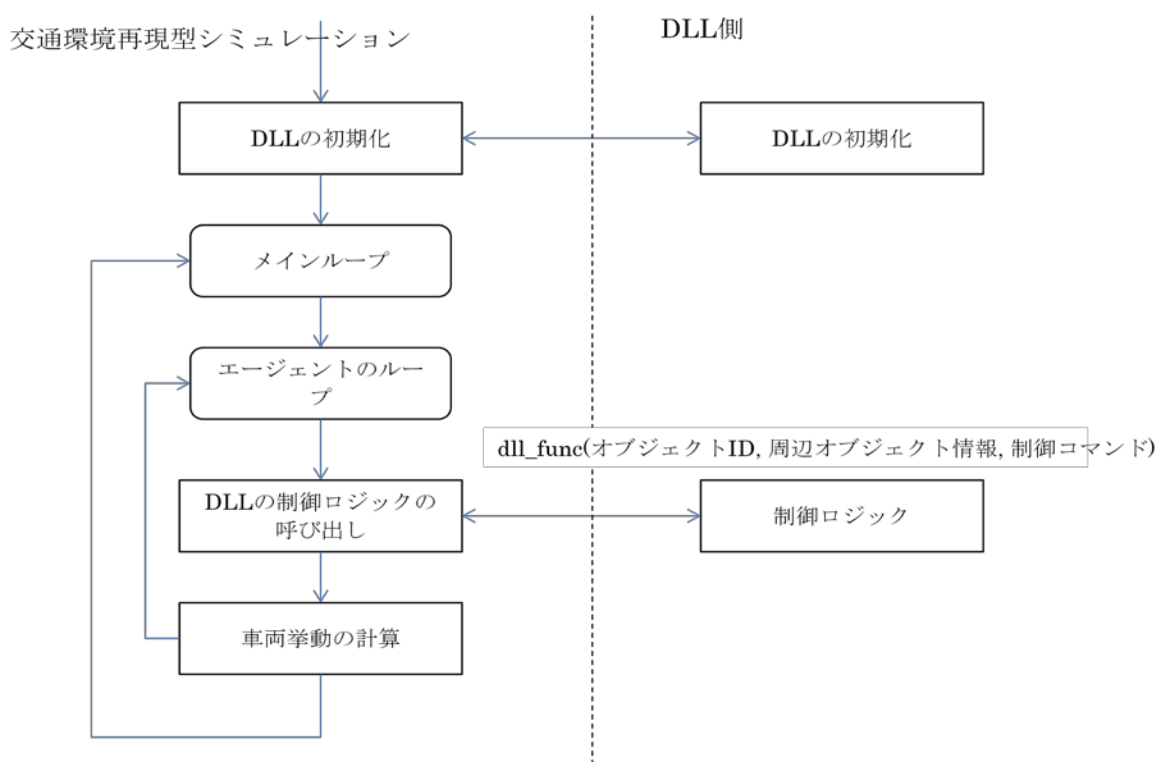


図 2.1.1-4 DLL 呼び出しによる制御ロジックのカスタマイズ

② 外部システムとのインターフェース連帯機能

シミュレーション中の車両1台を外部システムと置き換える場合は、以下に示すようにインターフェースを介して情報のやり取りを行うことで機能を実現する。用途としては、交通環境再現型シミュレーションにより再現される交通流のデータに基づいたセンサ情報を生成し、それを自動走行システムの制御システム開発ツールの制御ロジックへ入力することにより、自動走行車両の挙動を確認できる。また、自動走行車両が他車両と事故を起こさないように走行できるか、危険な走行をする他車両に対して自動走行車両がどのような対応をするか、といったことを確認する用途が考えられる。

さらに、交通環境再現型シミュレーションとドライビングシミュレータ（以下、「DS」

という) とを連携させることにより、DS に搭乗しているドライバが、交通環境再現型シミュレーション中の 1 台の車両を運転できるようになる。これによりシナリオベースの DS では非常に手間の掛かる多数の交通参加者が出現する交通環境状況での実験を、比較的容易に行う用途が考えられる。

これらの外部システムとのインタフェース連帯機能の可能性を検討する。

(i) 制御システム開発ツールとの連携

MATLAB/Simulink を代表例とする制御システム開発ツールとの連携を考慮すると、交通環境再現型シミュレーション側に、制御システム開発ツールと情報のやり取りを行うためのインタフェースを用意し、その間にツール間のギャップを解消するための中継ソフトを置くことが必要である。情報のやり取りは、UDP 通信により行うのが最も容易な方法である。交通環境再現型シミュレーション側のインタフェース仕様を公開することにより、中継ソフトを製作することが可能となる。詳細に関しては、2.5.1 項を参照。

(ii) ドライビングシミュレータとの連携

DS との連携についても、制御ソフト開発ツールとの連携と同様に、接続しようとする DS によって必要とする情報は異なるため、交通環境再現型シミュレーション側に DS と情報のやり取りを行うためのインタフェースを用意し、その間に DS との間のギャップを解消するためのデータ中継ソフトを置くことが必要である。DS との同期について、DS 側は、描画間隔以内にデータを受け取らないと、表示がコマ落ちした動きになると考えられる。コマ落ちを防ぐためにも、データ中継ソフトはリアルタイム性を確保することが求められる。交通環境再現型シミュレーション側からデータを受け取っていても、車両位置を記憶し、予測計算するなどによって、DS 側に確実にデータを送信する機能を実装することが求められる。詳細に関しては、2.5.2 項を参照。

2.1.2 シミュレーションで使用する道路構造設計

シミュレーション上で道路情報を使い易くするために、道路構造を、(1) 車両到達目標 (ウェイポイント)、(2) 車両走行経路と歩行者経路 (パス)、(3) 交通参加者 (車両、歩行者) の出場退場^註地点 (ノード)、(4) 道路構造物としての信号機、に分けて定義する。
注：出場 … エージェントが道路データ上に出現して、走行を開始すること。

退場 … エージェントが走行終了地点に到達して、道路データ上から消えること。

(1) ウェイポイントの定義

ウェイポイントとは車両の走行車線／走行軌跡を定義するための点 (座標値) と、その点での車線／軌跡の接線方向を持ったデータと定義する。このためパスの始点、終点もウェイポイントとして定義される。また、車両の出場地点、退場地点としても利用する。図 2.1.2-1 にウェイポイントの表現例を示す。

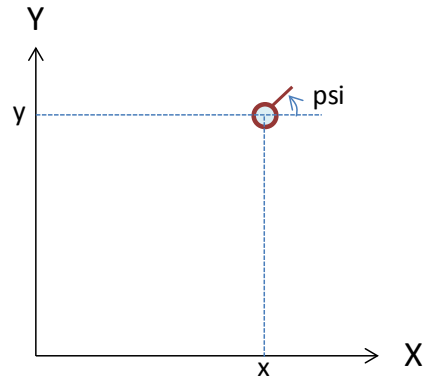


図 2.1.2-1 ウェイポイント

ウェイポイントは、ウェイポイント固有 ID 番号、座標 (x,y,z) 、（平成 29 年度 z は 0 で固定）ウェイポイントの方角および車両出場、退場のウェイポイントであるかどうかのフラグ変数で構成する。

(2) パスの定義

パスとは、車両の走行車線／走行軌跡を定義するための線分データとして定義する。パスが走行車線である場合には、パスは走行車線の中央の線形を表し、それに幅員データを与えることで、その車線の幅員が定まる。パスの始点と終点はウェイポイントであり、その間を複数の直線で結ぶことで、走行車線／走行軌跡を与える。図 2.1.2-2 にパスによる走行車線／走行軌跡の与え方を示す。

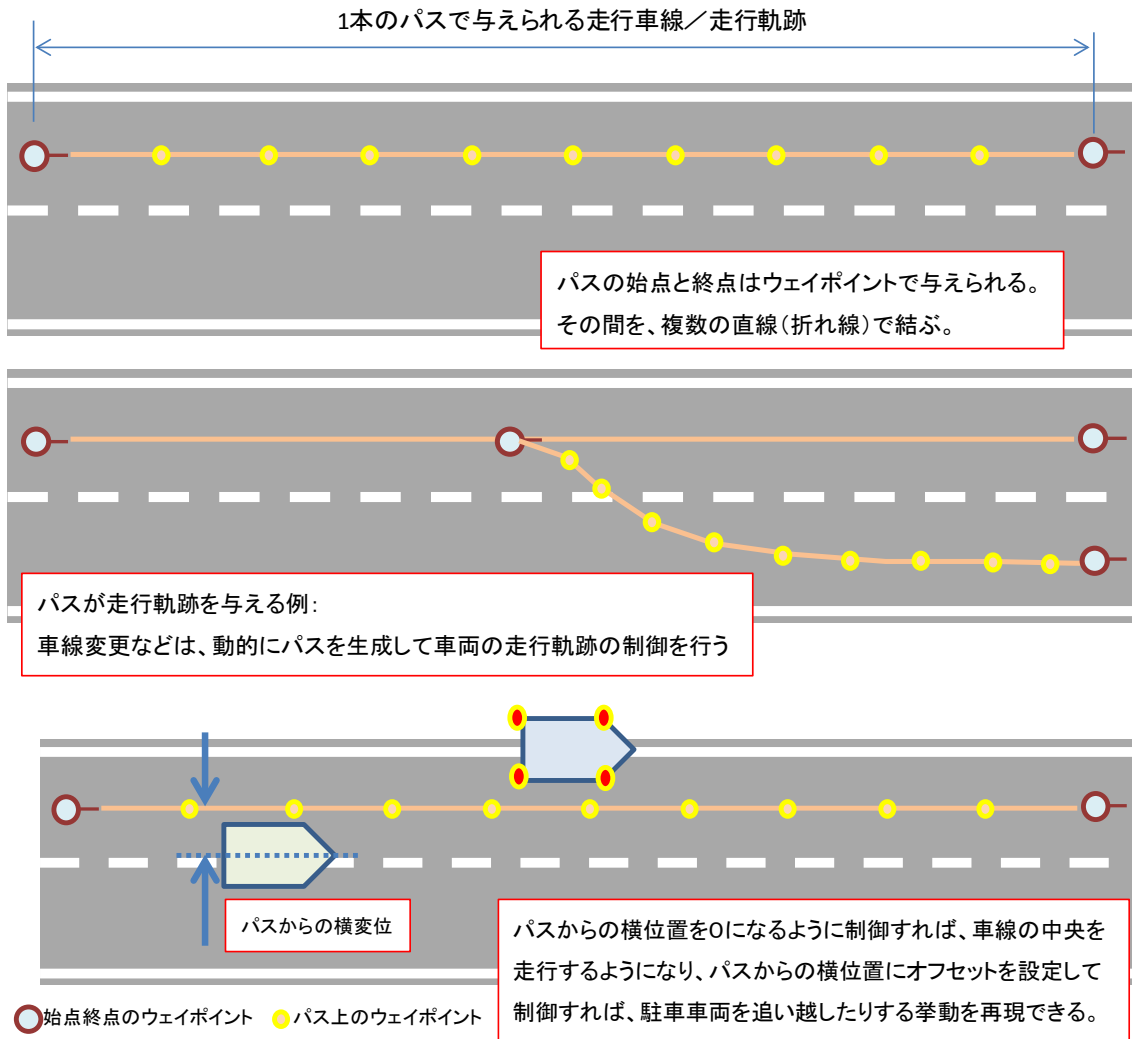
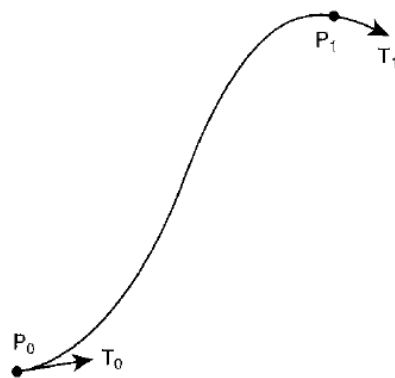


図 2.1.2-2 パスによる走行車線／走行軌跡の与え方

パスが保持する折れ線データは、三角スプライン曲線に基づいて作成する。三角スプラインは、2点の位置ベクトルと、その点での接線ベクトルが与えられると、図 2.1.2-3 に示す数式により与えられる。



$$P(\theta) = -T_1 \cos \theta + T_0 \sin \theta + (P_0 + T_1) \cos^2 \theta + (P_1 - T_0) \sin^2 \theta$$

図 2.1.2-3 三角スプライン関数

なお、三角スプライン曲線を使って計算する分割点での接線の方向ベクトルや曲率といった値は、道路エディタにて計算し道路環境データファイルに出力されるためシミュレーションプログラム側で再度計算する必要はない。図 2.1.2-4 に三角スプライン関数を使用したパスデータの構成要素を示す。パス同士の交点や停止線との交点のように、一度計算しておけばシミュレーション途中で変わらないなものは、予め計算結果を記憶しておき、そのまま利用できるようにする。さらに、そのパスが、どの交差点のどの交差方向につながっているのかについての情報も付与する。パスの接続関係を辿ることで、どの交差点につながっているかを調べることも可能であるが、シミュレーション中にパスとノードの接続関係が変わることはないので、予め計算結果を変数に格納しておき、そのまま利用できるようにすることで、ドライバエージェントの認知処理の計算負荷軽減に貢献できる。

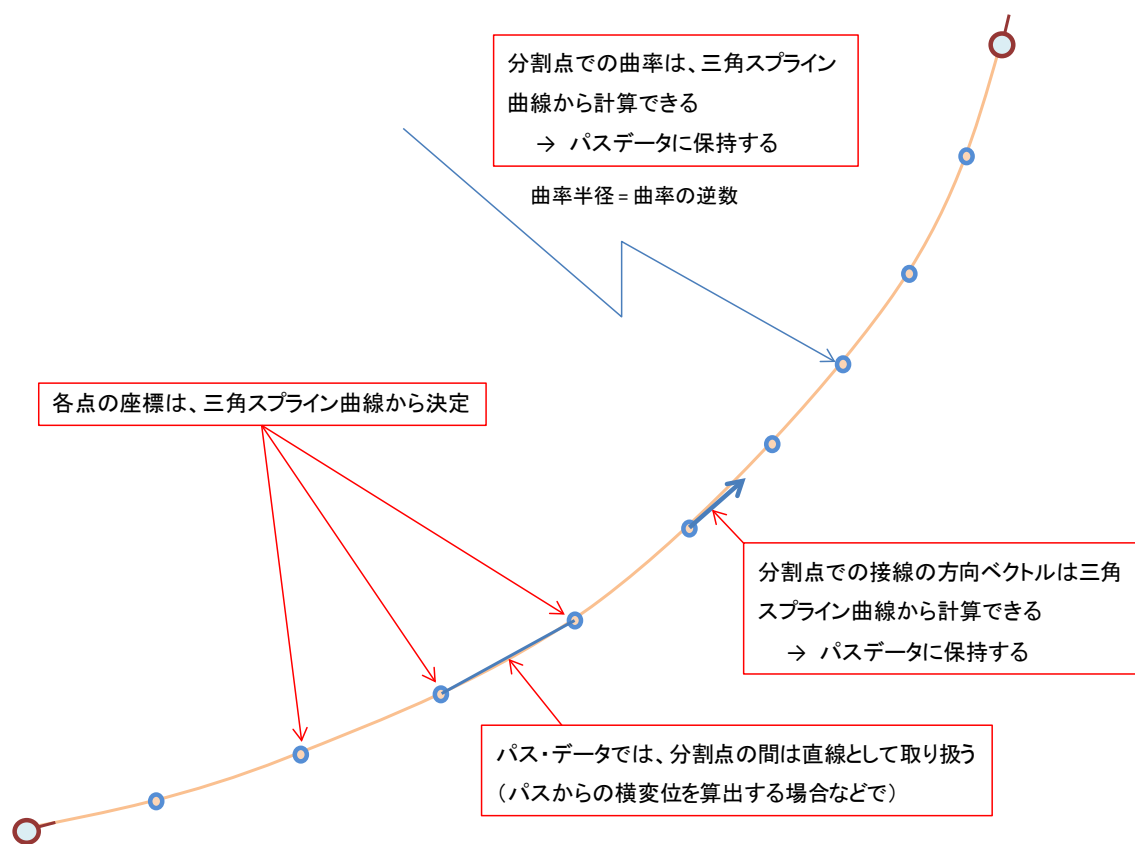


図 2.1.2-4 パスデータの要素

(3) ノードの定義

ノードとは、交差点を抽象化したデータとして定義する。交差点内の道路線形は、すべてパスによって表現される。ノード自体が道路の具体的な形状を与える必要性はなく、走行経路を表現したり、ドライバが自車両からみて交差点内の他車両がどの位置関係にあるかを意味づけるための情報として利用する。

ノードは、以下に示す幾何学的な情報を持つ。

① ノードの中心座標：

交差点の中心位置を定義する。経路探索に使用するのが主目的であり、車両の走行制御には影響を与えない。厳密に交差点の幾何学的な中心である必要性はない。

② 方向 ID：

交差単路には、区別するための方向 ID (0~交差単路数-1) を割り当てる。方向 ID の付け方は、特に決まりはないものとする。また、交差点に入ることを「進入」、交差点から出ていくことを「進出」と呼ぶ。

③ 交差単路の交差方向方位角：

交差点の交差単路には、方向 ID のほかに、交差モデル ID 番号を定義する。交差モデル ID は、交差方位角によらずに、右左折、直進、対向方向を決定するために利用する。以下のルールにより、右左折・直進を判定する。2つの方向に対応付けられた交差方向モデルの番号を m (進入側), n (進出側) として、判断は以下のとおり行われる。

$|n - m| = 5, 6, 7 \rightarrow$ 直進

$n - m = 2, 3, 4, -8, -9, -10 \rightarrow$ 左折

$n - m = -2, -3, -4, 8, 9, 10 \rightarrow$ 右折

具体例として、図 2.1.2-5 の場合、方向 ID=4 から進入して、方向 ID=2 へ進出したとすると、 $m=8, n=4$ が道路環境エディタより付与されているので、 $n - m = 4 - 8 = -4$ となり右折と判断できる。

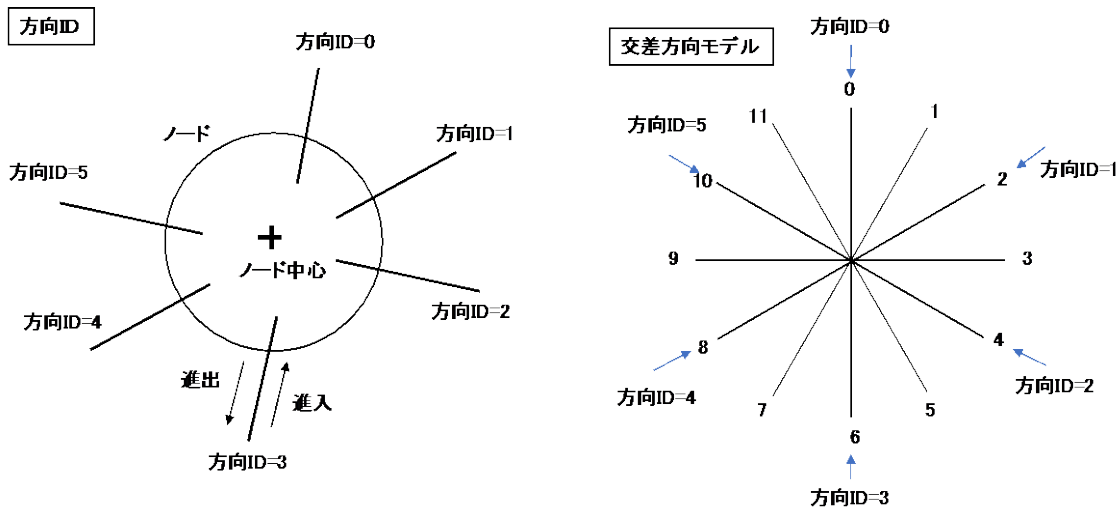


図 2.1.2-5 交差方向モデル

図 2.1.2-5 で示されたノードの進入／進出の関係は表 2.1.2-1 のような対応となる。カッコ内の数値は、上記の $n - m$ の値である。

表 2.1.2-1 方向 ID と進入／進出の関係

進入／進出	方向 ID = 0	方向 ID = 1	方向 ID = 2	方向 ID = 3	方向 ID = 4	方向 ID = 5
方向 ID = 0	—	左折(2)	左折(4)	直進(6)	右折(8)	右折(10)
方向 ID = 1	右折(-2)	—	左折(2)	左折(4)	直進(6)	右折(8)
方向 ID = 2	右折(-4)	右折(-2)	—	左折(2)	左折(4)	直進(6)
方向 ID = 3	直進(-6)	右折(-4)	右折(-2)	—	左折(2)	左折(4)
方向 ID = 4	左折(-8)	直進(-6)	右折(-4)	右折(-2)	—	左折(2)
方向 ID = 5	左折(-10)	左折(-8)	直進(-6)	右折(-4)	右折(-2)	—

(4) 信号機の定義

信号機とは、交差点への進入制御を行うためのオブジェクトであり、ドライバエージェントに信号現示情報を伝達する。信号機固有番号である信号機 ID、信号機の座標、高さ、設置されているノード ID、制御しているノードへの進入方向、進入方向 ID の車線番号、信号現示のパターンデータなどで構成されている。信号機の情報、道路環境エディタから出力される道路データファイルに記載される。

ドライバエージェントが信号を知覚したときに、その信号が今向かっている交差点のものであるのかを判定するために、設置ノードと制御している進入方向の情報を利用する。

2.2 交通事故低減詳細効果シミュレーション本体機能の開発

本節では、マルチエージェント機能を織り込むためのシミュレーション本体機能を、複数の交通参加者を制御するシミュレーション管理機能 (2.2.1 節)、マルチエージェントによる n 対 n の処理を行う車両エージェント機能 (2.2.2 節)、交通環境再現の中で歩行者行動を定義する歩行者エージェント機能 (2.2.3 節)、道路情報の取り込み機能 (2.2.4 節)、ログ出力機能 (2.2.5 節) に分けて述べる。

2.2.1 シミュレーション管理モジュールの開発

マルチエージェント機能を有するシミュレーション管理モジュールの主な機能を以下に説明する。

- ・各設定処理を行い、シミュレーションの実行管理・時間管理を行う。
- ・各交通参加者の出場・退場処理を行う。
- ・事故判定を行う。

シミュレーション管理モジュールの概略フローを図 2.2.1-1 に示す。

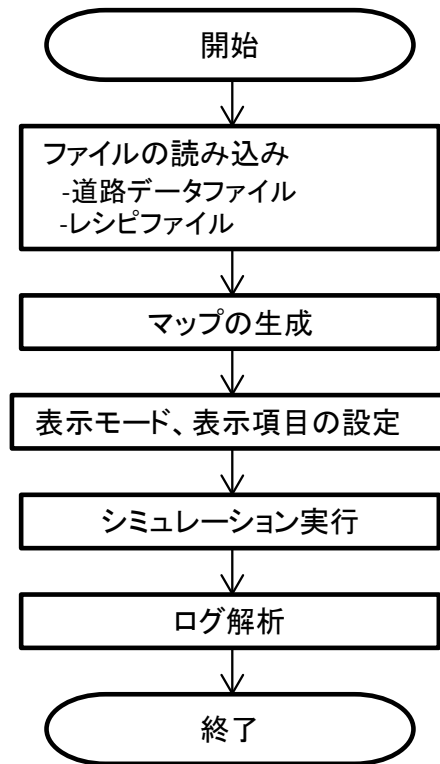


図 2.2.1-1 シミュレーション管理モジュールの概略フロー

(1) シミュレーション管理モジュールにおける実行条件の設定

設定処理には、以下に示す機能が存在する。

- ・設定ファイル読み込み（道路データファイル、レシピファイル）
- ・シミュレーション時間の単位設定

① 設定ファイル読み込み

シミュレーションで使用する道路データを読み込みメモリ上に展開する、また、シミュレーション実行条件（運転支援システム、自動走行システムの動作条件やドライバ特性など）をレシピファイルから取り込む。

② シミュレーション時間の単位設定

時々刻々変化する車両の位置は、このシミュレーション単位時間毎に処理される。シミュレーションの単位時間は正の整数で指定可能とする。シミュレーション単位時間のデフォルト値は 10[ms]とし、単位時間 a が指定された場合はシミュレーション単位時間を a[ms]としてシミュレーションを実行する。

(2) シミュレーション管理モジュールにおける各交通参加者の出場・退場処理

シミュレーション管理モジュールは(1)で述べた入力に従い、シミュレーションの実行単位時間ごとに交通参加者の出場・退場を制御する。交通参加者の出場は、出場ポイントにおいて間隔を指定された分布に従い出場させ、移動を開始する。各交通参加者は出場時点において退場地点までの経路を決定する。また、交通参加者出場時にその交通参加者の行動特性が決定される(ランダムもしくは指定による)。指定された特性によって交通参加者の移動速度や各種反応時間が変化する。

シミュレーション管理モジュールはシミュレーション終了条件を満たすまで上記処理を繰り返し実行する。シミュレーション実行部分の概略処理フローを図 2.2.1-2 に示す。

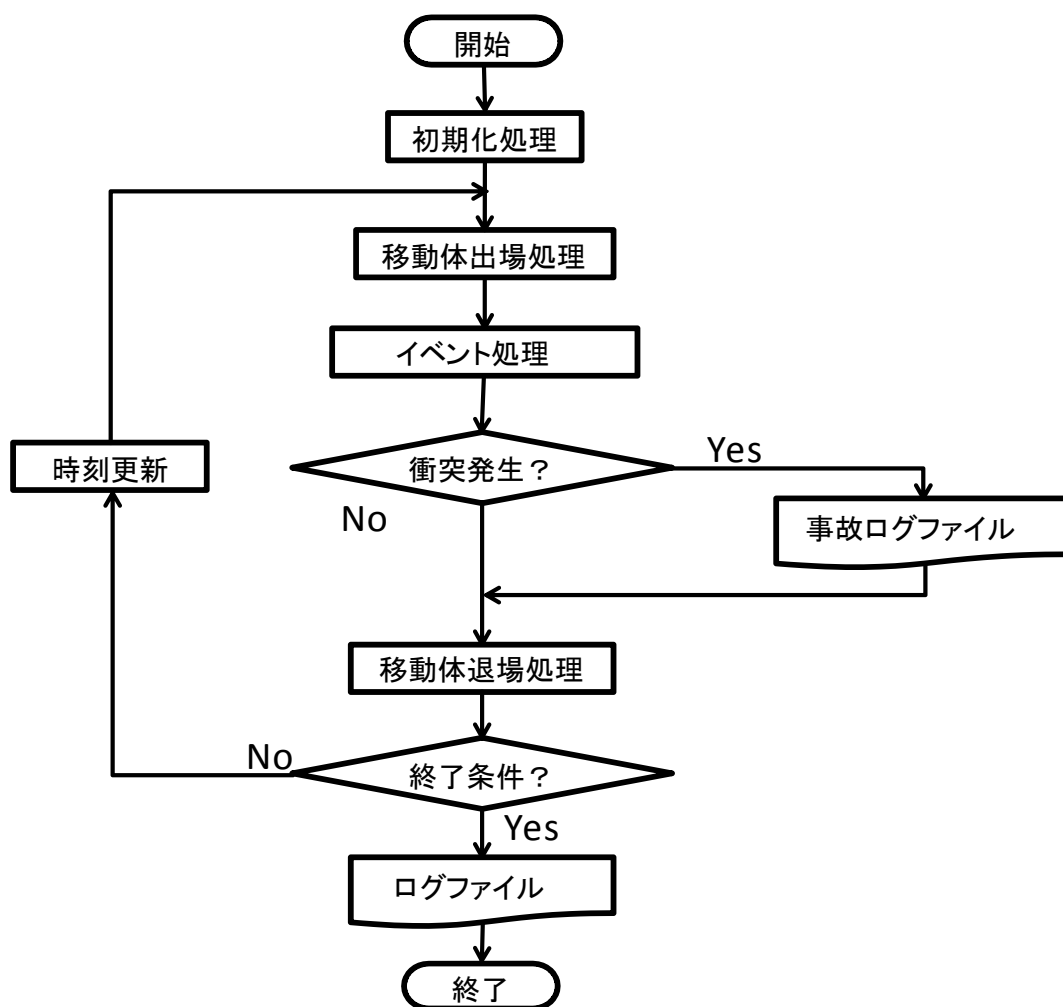


図 2.2.1-2 シミュレーション実行部分 概略処理フロー

(3) シミュレーション管理モジュールにおける事故判定方法

各交通参加者の現在位置とサイズの情報から、図 2.2.1-2 における衝突発生判定の部分で事故の発生の有無を検出する。

衝突と判定された場合の事故ログ出力においては、単に衝突の判定をするだけでなく、衝突した交通参加者のそれぞれに対して、

- ・事故発生時の交通参加者の重心座標。座標系は東西がX（東が+）、南北がY（北が+）
 - ・事故発生時の交通参加者の進行方向ベクトル
 - ・事故発生時の交通参加者の向きベクトル
 - ・車両のアクセル設定値（ドライバからの指示値に対しアクセル踏み替え時間（以下、「ART」という）をもとに調整し最大加速度と比較して最終決定された操作量）
 - ・車両のブレーキ設定値（ドライバからの指示値に対しブレーキ踏み替え時間（以下、「BRT」という）をもとに調整し最大減速度と比較して最終決定された操作量）
 - ・車両のステアリング設定値（ドライバからの指示値と等価）
 - ・ブレーキランプの点灯状態
 - ・安全装置警報状態
 - ・車両ボディの四隅の位置
- をログに出力する。

2.2.2 車両エージェントモジュールの開発

本項では、マルチエージェント機能を織り込んだ車両エージェントモジュールの開発として、

- (1) 通常走行時のドライバエージェント
 - (2) 模範ドライバにて模擬する自動走行システムエージェントと理想的なセンサ仕様
 - (3) 増大する演算を削減するための車両オブジェクトの演算方法
- について述べる。

平成 29 年度の交通環境再現型シミュレーションの車両エージェントは、図 2.2.2-1 の要素によって構成され、構成要素毎に個々の特性パラメータを割り当てて生成される。車両エージェントモジュールは車両エージェントの生成をコントロールする。

シミュレーションで使用する車両エージェントを生成するモジュールに関し以下に説明する。

車両エージェントの構成を図 2.2.2-1 に示す。

- ・ドライバエージェント
- ・自動走行システムエージェント
（自動走行システムを搭載している場合のみ）
- ・車両オブジェクト

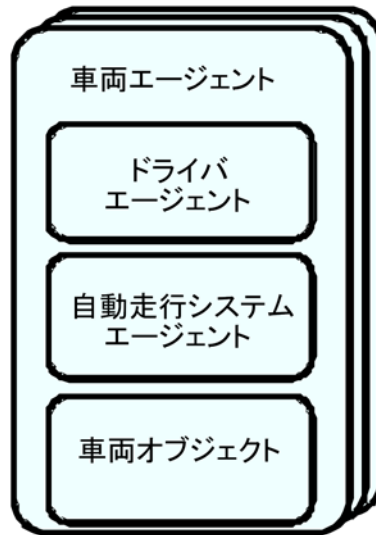


図 2.2.2-1 車両エージェントの構成

(1) ドライバエージェントの開発

平成 29 年度開発の交通環境再現型シミュレーションに実装したドライバエージェントは、平成 27、28 年度に開発²⁻²⁾したものに準拠している。ここでは平成 28 年度版から平成 29 年度版に移行するにあたり変更された部分を解説する。

ドライバエージェントは大きく分けると知覚・認知・判断・操作・短期記憶のクラス^注に分けられる。通常の処理は、シミュレーション実行単位毎に道路環境や周辺状況からの情報をもとに知覚・認知・判断・操作の順に処理を行い、ドライバの操作量に従い車両を走行させることである。事故を模擬的に発生させるために、一定確率で知覚エラーが発生させるが、その場合は、短期記憶(過去 1[sec])に保持されている検知車両情報が残っている限りは認識・判断・操作を行う。短期記憶がなくなった場合、探知車両なしとして動作する。ドライバエージェントの大まかな処理の流れは図 2.2.2-2 に示す。

注：クラスとは、C++の用語で、構造化されたデータと関数で構成されている処理の単位である。

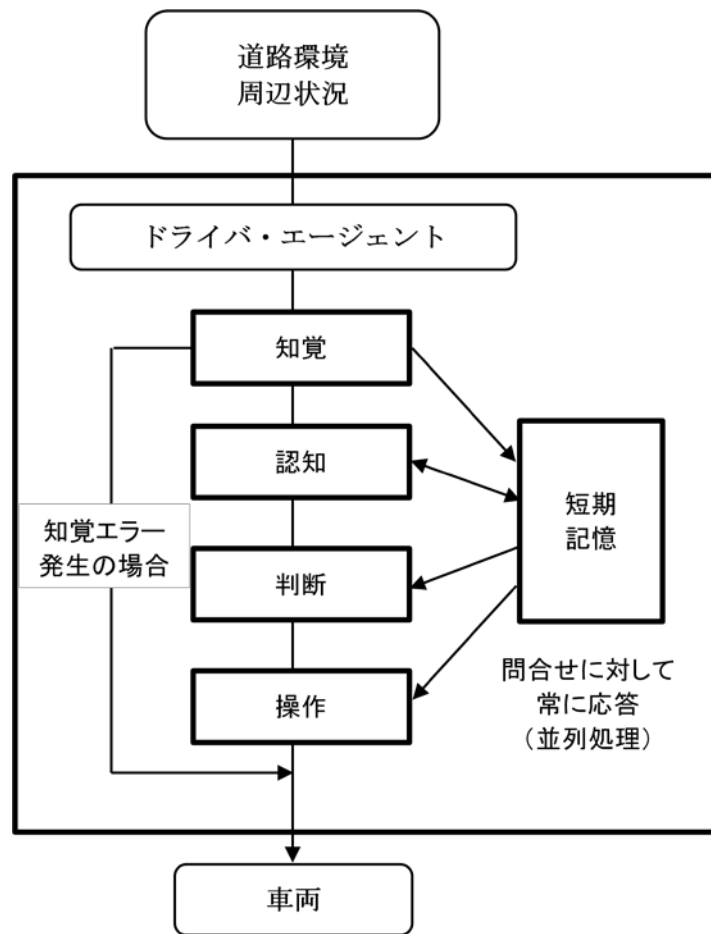


図 2.2.2-2 ドライバエージェントモデルの概要

① 知覚クラス

ドライバエージェントの知覚を模擬するためのクラスである。平成 29 年度の知覚は、自車両を中心にした知覚範囲の円の内部に存在する交通参加者を検知する。平成 27、28 年度に開発した脇見、よそ見、眠気等による知覚に関する事故要因とは別に、事故発生要因検討のために、目を閉じているため知覚できない状態である知覚エラーも実装した。詳細については、2.4.1 項で説明する。この知覚エラーが未発生の場合の処理は、次の②認知クラスに進む。

② 認知クラス

ドライバエージェントの認知を模擬するためのクラスである。このクラスは知覚から受け取った交通参加者情報を短期記憶（検知した車両情報を最新の 1[sec]記憶するメモリ）に結合していく。以下の処理を順次実行する。

(i) 短期記憶との結合

- a. 知覚から受け取った複数の交通参加者情報を、それぞれの AgentID (各エージェントに一意に割り当てられた番号) を用い短期記憶上の過去に検知した情報と照合する。
- b. 短期記憶上に同一の AgentID を持つ交通参加者があった場合は、その位置情報等を更新する。同時にその交通参加者の検知時刻も更新する。
- c. 短期記憶に存在しない AgentID を持つ交通参加者は、今回初めて検知できたものと判断し、短期記憶に追加する。

(ii) 短期記憶の古いデータの削除

- a. 短期記憶上には、過去に検出した交通参加者情報が存在する。その中から検出時刻から記憶を保持する時間である短期記憶時間 (1[sec]) 以上たっている交通参加者情報を削除する。前述の (i) a 短期記憶との結合処理で検出時刻が更新されている交通参加者は削除対象とはならない。

(iii) 短期記憶量の制限

- a. 現実のドライバは大量の車両情報を同時に記憶できない。本シミュレーションでは、短期記憶にある AgentID を持つ交通参加者を自車両との重心距離でソートし近いものから 20 個保存し、それ以上遠くにある交通参加者は短期記憶から削除する。

また、認知クラスでは、短期記憶内に格納されている車両オブジェクトへのラベル (認知結果のマーカ) 付けを行っている。平成 29 年度はラベル付けの結果を GUI 出力で利用している。

車両オブジェクトのラベル付けに使用する 2 つの用語を定義する。

• **DrivingLane**

その車両が走行を予定しているパス一覧のことである。道路状況に応じてドライバが走行ルートを変更することが予想されるので、一意の値とはならない。

• **CurrentPath**

その車両がまさに今乗っているパスのことである。

ラベル付けに先立ち、他車両ノード一覧を作成する。これは、他車両の進入予定のノード一覧のことである。ラベル付け対象になる他車両は、知覚で検知されたオブジェクトでおよそ 200m 範囲と想定される。他車両と自車両が関係を持つノードは、他車両のこれからの進入予定ノードを 3~10 ノード分先読みする必要がある。具体的には、知覚が検知した他車両の **DrivingLane** を辿り、これから進入予定のノード一覧を取得することにより、他車両ノード一覧を作成する。ラベルは次に示す通り処理方法として 11 区分の 19 種類作成される。

- 1) 先行車
- 2) 後続車
- 3) 左側先行車、左側後続車
- 4) 右側先行車、右側後続車
- 5) 対向車
- 6) 対向右折車、対向左折車
- 7) 右側交差車、左折交差車
- 8) 右側交差右折車、右側交差左折車
- 9) 左側交差右折車、左側交差左折車
- 10) 歩行者（自転車を含む）、右方向横断歩行者、左方向横断歩行者
- 11) その他

1) 先行車 (PRECEDING)

同じパスを走行する先行車両である。

判定条件

他車両の **CurrentPath** が自車両の **DrivingLane** に含まれていて、かつ、以下の 2 条件を満たしている。

- ・他車両の **CurrentPath** が自車両の **CurrentPath** より先のパスである。
- ・そのパス先頭からの距離 (**distance**) が自車より小さい。

2) 後続車 (FOLLOWING)

同じパスを走行する後続車両である。

判定条件

他車両の **CurrentPath** が自車両の **DrivingLane** に含まれていて、かつ、以下の 2 条件を満たしている。

- ・他車両の **CurrentPath** が自車両の **CurrentPath** より後のパスである。
- ・そのパス先頭からの距離 (**distance**) が自車両より大きい。

3) 左側先行車 (LEFT PRECEDING)、左側後続車 (LEFT FOLLOWING)

自車両の左側車線を走行中で、かつ自車両の前（後ろ）を走行する車両である。

判定条件

自車両が通過予定の **NodeID** を **DrivingLane** から取得し、**mNDi** とする。（ここで添字 **i** は走行予定のノードが複数あるので添字を付けている。**i=0~3** を考えている。添字の意味は、以下同様である）そのノードへの進入方向を **mNDiIn**、そのノードからの進出方向を **mNDiOut** とする。同様に他車両の **CurrentPath** から取得した車両が向かっているノード **yND** とその進入方向 **yNDIn** とする。

判定方法

- ・他車の **CurrentPath** が自車の **DrivingLane** に含まれないこと。
- ・自車と他車の同ノードへの進んでおり進入方向 **ID** が等しいこと。

・ $mNDi = yND$ かつ $mNDiIn = yNDIn$ であること。

自車の CurrentPath の分割線と、他車のベクトルの幾何判定で前後、左右を判定する。即ち、自車走行中の分割線の先頭 A と、自車の位置 B からなる線分 AB と、他車の位置への線 AC とし以下のこのベクトル判定を行うことでラベル付けできる。

① ベクトル AB とベクトル AC の外積が正である。(左側にいる)

② ベクトル AB とベクトル AC の内積が正で、かつ、 $|AC| \leq |AB|$ のとき先行しているとする。

③ ベクトル AB とベクトル AC の内積が負、あるいは $|AB| < |AC|$ のとき、後続しているとする。

4) 右側先行車 (RIGHT PRECEDING)、右側後続車 (RIGHT FOLLOWING)

自車両の右側車線を走行中で、かつ自車両の前(後ろ)を走行する車両である。

上記 3) 左側先行車 (LEFT PRECEDING)、左側後続車 (LEFT FOLLOWING) において条件はすべて同じで判定部分の①のみ

① ベクトル AB とベクトル AC の外積が負である。(右側にいる)

と変更することでラベル付けできる。

5) 対向車 (ONCOMING)

自車両の進行方向に、対向から走行してくる車両である。

判定条件

自車両の向かっているノードを mND 、そのノードへの進入方向を $mNDIn$ 、その方向に対する対向方向を $mNDOc$ とする。また、1つ前に通過したノード (mND に $mNDIn$ 方向から進入できるノード) を $mNDPast$ 、そのノードからの進出方向を $mNDPd$ とする。

ONCOMING の条件は、以下の何れかの条件が成立するときである。

- ・ 自車両が進入予定のノードに正面から進入する車両である。
 - ・ 他車両の CurrentPath が通過予定のノード $yNDi$ とその進入方向 $yNDiIn$ が $mND = yNDi$ かつ $mNDOc = yNDiIn$ である。
 - ・ 自車両が直近で通過したノードに向かっている対向車両である。
 - ・ 自車両が直近で通過したノード $mNDPast$ と、その進出方向 $mNDPd$ 、他車両が通過予定のノード yND 、その進入方向 $yNDIn$ の関係が $mNDPast = yND$ かつ $mNDPd = yNDIn$ である。
- 図 2.2.2-3 に対向車の近接パターンを示す。

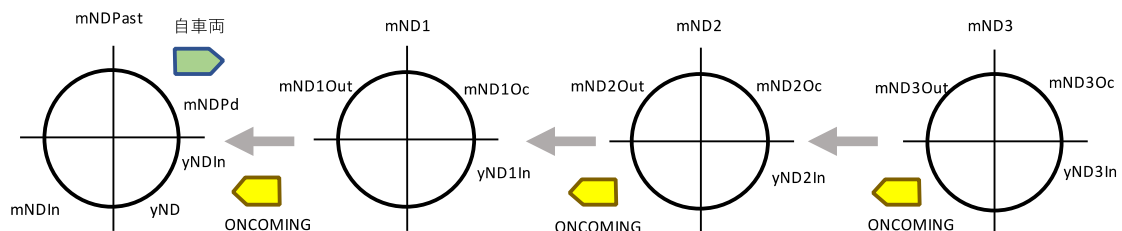


図 2.2.2-3 対向車 (ONCOMING) 接近パターン

6) 対向右折車 (ONCOMING RIGHT TURN)、対向左折車 (ONCOMING LEFT TURN)

自車両が進入しようとしているノードに対して、左側から進入 (右側から進入)しようとしている車両である。

判定条件

自車両が進入しようとしているノードを mND 、そのノードへの進入方向を $mNDIn$ 、その方向に対する対向方向を $mNDOc$ とする。対向左折車両のラベルは、その車両の $CurrentPath$ から取得できる。他車両のノード一覧 yND とその進入方向 $yNDIn$ が、 $mND = yND$ かつ $mNDOc = yNDIn$ であり、かつ、その車両の $CurrentPath$ から取得できるノードからの進出方向 $yNDOut$ が、 $yNDIn$ からみて左折方向になっている場合が、対向右折車両である。

同様に右折方向になっている場合が、対向左折車両である。

7) 右側交差車 (RIGHT CROSS)、左側交差車 (LEFT CROSS)

自車両が進入しようとしているノードに、自車両から見て右折方向 (左折方向) から進入する車両である。

判定条件

自車の向かっているノードを mND 、そのノードへの進入方向を $mNDIn$ 、その方向に対する右折方向を $mNDRd$ とする。

判定方法

右側交差車は、次の条件を満たす。

- ・自車が向かうノードに右側より進入しようとしている車両である。
- ・自車が向かうノード mND と、その方向から見て右折方向にある $mNDRd$ に対して、他車の $CurrentPath$ を使い、その車両が向かっているノード一覧の中の yND とその進入方向 $yNDIn$ が、 $mND = yND$ かつ $mNDRd = yNDIn$ である。

図 2.2.2-4 に右側交差車の接近パターンを示す。

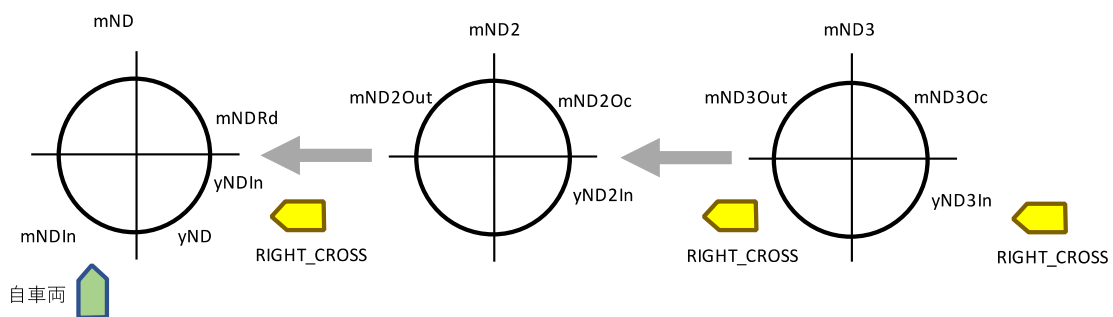


図 2.2.2-4 右側交差車 (RIGHT_CROSS) 接近パターン

判定方法

左側交差車は、以下の条件を満たす。

- ・自車進入方向 $mNDIn$ と、その方向に対する左折進入方向 $mNDLd$ で比較する。
 $mND3 = yND$ かつ $mND3Oc = yNDIn$ である。

8) 右側交差右折車 (RIGHT CROSS RIGHT TURN)、

右側交差左折車 (RIGHT CROSS LEFT TURN)

自車両が次のノードで右折しようとするとき、そのノードに右折進入 (左折進入) しようとする車両をである。

判定条件

自車両の向かっているノードを mND 、そのノードへの進入方向を $mNDIn$ 、その方向に対する右折方向を $mNDRd$ とする。

右側交差右折車両のラベルは、他車両の $CurrentPath$ から取得から取得できる。その車両が進入予定のノードのいずれかに関して $mND = yND$ かつ $mNDRd = yNDIn$ であり、他車両のノードからの進出方向 $yNDOut$ が、 $yNDIn$ からみて右折方向になっていることである。

同様に $yNDIn$ から見て左折方向になっている場合、右側交差左折車両とする。

9) 左側交差右折車 (LEFT CROSS RIGHT TURN)、

左側交差左折車 (LEFT CROSS LEFT TURN)

自車両が次のノードで左折しようとするとき、そのノードに右折進入 (左折進入) しようとする車両である。

判定条件

自車両の向かっているノードを mND 、そのノードへの進入方向を $mNDIn$ 、その方向に対する左折方向を $mNDLd$ とする。

右側交差右折車両のラベルは、他車両の $CurrentPath$ から取得から取得出来る。その車両が進入予定のノードのいずれかに関して $mND = yND$ かつ $mNDLd = yNDIn$ であり、他車両のノードからの進出方向 $yNDOut$ が、 $yNDIn$ からみて右折方向になっていることである。

同様に $yNDIn$ から見て左折方向になっている場合、左側交差左折車両とする。

10) 歩行者 (自転車を含む) (PEDESTRIAN)、右方向横断歩行者 (RIGHT CROSS PEDESTRIAN)、左方向横断歩行者 (LEFT CROSS PEDESTRIAN)

歩行者は、自転車も含めた歩行者である。右方向横断歩行者は、パスを左方向 (横変位では、正の方向から負の方向へ変化するもの) に横断する歩行者・自転車である。同様に、左方向横断歩行者は、パスを右方向 (横変位では、負の方向から正の方向へ変化するもの) に横断する歩行者・自転車である。

11) その他 (UNDEFIND)

上記いずれにも該当しないオブジェクトに付与する。

③ 判断クラス

判断クラスでは、自車両の **DrivingLane** の情報と短期記憶に格納されている車両エージェント一覧の情報からハンドル操作量と加減速操作量を決定する。加減速の制御は、基本的に平成 27、28 年度に開発したウィーダーマンモデルで行っている。ウィーダーマンモデルは、追従の挙動を模擬するモデルであり、先行車両と自車両との速度差と車間距離で加速減速、等速、空走等の走行モードを判断する。また、ドライバ特性（**A** 法令遵守傾向、**B** 運転スキル、**D** 覚醒水準）により加減速操作量等を変化させる。

判断クラスは、下部クラスとして、道路状況判断クラス、停止線判断クラス、先行車判断クラスを持つ。

ここで、停止距離について 2 つの場合分けをしている。速度 $V[m/s]$ で走行している車両に対して、停止距離を通常の減速（停止線での停止）で停止する場合と少し大きめの減速（信号による停止）で停止する場合で考えている。

- ・通常の減速 ($0.98[m/s^2]$) の場合 $D_1 = 0.5097 \times V^2$
- ・少し大きめの減速 ($2.45[m/s^2]$) の場合 $D_2 = 0.2039 \times V^2$

(i) 道路状況判断クラス

道路状況判断クラスの、機能は次のとおりである。

a. ウィンカの点灯決定：右左折手前のときにウィンカをつける操作を行う。

b. 最低速度の決定

DrivingLane に沿って D_1 の距離にある走行予定のパス情報より希望速度を得る。

ただし、 $D_1 < 100[m]$ のときは、 $100[m]$ とする。

c. 仮想車両の配置

仮想車両を配置する判断は、以下の条件のとき仮想車両を配置しウィーダーマンモデルに従い処理を行っている。前述のようにウィーダーマンモデルは先行車両に対しての追従モデルであるので、パス上の地点にある速度の仮想車両が存在するとしてウィーダーマンモデルにより制御する。

- ・最低速度のパスがこの先にある場合、そのパスの始まりのウェイポイントに仮想車両を配置する。仮想車両の速度は、そのパスの希望速度としブレーキ操作はしていないとする。

- ・希望速度の区間到達までに $3[sec]$ 以上の場合は、希望速度の開始地点に仮想車両を配置する。

- ・希望速度のパス到達までが $3[sec]$ 未満の場合は、自車両の $20[m]$ 先に仮想車両を配置する。希望速度のパスにすでに進入している場合は、仮想車両は配置しない。

d. ハンドル角の決定：

現在の車両の進行方向で $1[sec]$ 後に到達する地点と、**DrivingLane** を現在の速度で $1[sec]$ 間走行したときに到達するパス上の地点との間の距離を計算し、その距離にゲイン係数 (0.85 の値を利用) 倍したものをハンドル角度 $\delta_{sw}[rad]$ とする。ここで、車両速度が $1[m/s]$ 未満である場合は、 $1[m/s]$ としている。

(ii) 停止線判断クラス

これから走行するパス上にある停止線とその停止線を支配している信号表示情報を使い、停止線で止まる必要があるか判断する。右折待ち停止線に関しては、交差点進入前の時点ではその右折待ち停止線に停止する必要があるという判断をする。停止する必要がある停止線までの距離を $D_{SL}[m]$ とする。

a.信号停止線

停止位置が信号停止線の場合、信号現示を取得し、通過・停止の判断を行う。

以下の直進、右折、左折、それぞれに対して以下の条件のいずれかが成り立つときに停止と判断する。それ以外の場合は、通過と判断する。

・信号が設置されているノードを直進の場合

条件1：現在の信号現示の1つ前の信号現示が「青」あるいは「直進矢印」で、現在の信号現示が「黄」、かつ、 $D_2 < D_{SL}$

条件2：現在の信号現示の1つ前の信号現示が「黄」で、現在の信号現示が「赤」、かつ、現在の信号現示が「直進矢印」でない、かつ、 $D_2 - 10.0 < D_{SL}$

・信号が設置されているノードを右折の場合

条件1：現在の信号現示の1つ前の信号現示が「青」あるいは「右矢印」で、現在の信号現示が「黄」、かつ、 $D_2 < D_{SL}$

条件2：現在の信号現示の1つ前の信号現示が「黄」で、現在の信号現示が「赤」、かつ、現在の信号現示が「右矢印」でない、かつ、 $D_2 - 10.0 < D_{SL}$

・信号が設置されているノードを左折の場合

条件1：現在の信号現示の1つ前の信号現示が「青」あるいは「左矢印」で、現在の信号現示が「黄」、かつ、 $D_2 < D_{SL}$

条件2：現在の信号現示の1つ前の信号現示が「黄」で、現在の信号現示が「赤」、かつ、現在の信号現示が「左矢印」でない、かつ、 $D_2 - 10.0 < D_{SL}$

b.右折待ち停止線

交差点に入ったかどうかは、右折待ち停止線が存在しているノードへのノード進入ポイントを通過したかどうかで判断する。交差点進入前では右折待ち停止線で停止できるように、右折待ち停止線に仮想車両を配置する。交差点進入後は交錯点危険判定を行い、1つでも危険と判断した場合は右折待ち停止線に仮想車両を配置する。すべての交錯点で危険判定がなかった場合は、右折待ち停止線に仮想車両を配置しない。

交錯点ごとの危険判定は、短期記憶に格納されている車両エージェントで、交錯点に進入してくる車両のうち最も交錯点に近い車両を対象に、その速度と交錯点までの距離

から到達予想時間を求め、自車両が交錯点に到達するまでの予想時間の±3[sec]以内であった場合は危険と判定する。この 3[sec]はシミュレーション設定ツールで変更可能である。

(iii) 先行車判断クラス

短期記憶に格納されている車両オブジェクトで、先行車ラベル付けされているものの中で、最も近い車両エージェントに対し車両情報を使って仮想車両を作成する。自車速度、仮想車両速度、車間距離から Time To Collision（以下、「TTC」という）を求め、加減速の判断をする。

以上のように判断クラスでは道路状況クラス、停止線判断クラス、先行車判断クラスが配置した仮想車両のうち、TTC の最小の仮想車両を判断対象とする。同時に判断クラスでは、道路状況クラスから希望速度とハンドル角度を取得する。これらの情報をウィーダーマンモデルに渡し、加減速指示と操作量を得る。操作量は、④操作クラスを参照のこと。

④ 操作クラス

操作クラスでは、2.2.2 (3) 車両オブジェクトで解説する車両オブジェクトへの入力量であるアクセル操作量 $\delta_A[m/s^2]$ 、ブレーキ操作量 $\delta_B[m/s^2]$ をそれぞれ判断クラスで求めた加速度 (Acc[m/s^2])、減速度 (Brak[m/s^2]) より算出する。ハンドル操作量は判断クラスで求めた $\delta_{sw}[\text{rad}]$ と同じ値とする。また、ペダルの踏み替えが必要な場合は、ドライバ特性より求まるART[sec]、BRT[sec]により操作のタイミングを遅延させる。

⑤ 短期記憶クラス

平成 29 年度開発の交通環境再現型シミュレーションでは、短期記憶として AgentID に基づき位置情報や検出時刻等を保存するメモリを確保している。知覚クラスでは、自車両を中心にした知覚範囲の円の内部に存在する交通参加者を検知する。交通参加者は AgentID で管理しており、一意である。次に認知クラスにおいて知覚から受け取った交通参加者情報を短期記憶に結合していく。短期記憶上の過去に検出した交通参加者情報と照合し短期記憶上に同一の AgentID があった場合は、その位置情報や検出時刻を更新することである。短期記憶に存在しない AgentID の場合は、短期記憶に追加する。短期記憶に保管されている情報は、検出時刻から 1[sec]の間保持されている。この時間を短期記憶時間と呼ぶ。短期記憶内のデータは、検出時刻から短期記憶時間を経たものは削除される。さらに、短期記憶容量に制限を設けている。短期記憶にある AgentID を持つ車両を自車両との重心距離でソートし近いものから 20 個までを保存している。それ以外は削除される。

この短期記憶に保存されている AgentID は判断クラスで使用されている。短期記憶は、メモリ上の構造化されたデータの形で実装しているため必要であれば、認知クラス、判断クラス、操作クラスからいつでも照会可能である。

(2) 自動走行システムエージェントの開発

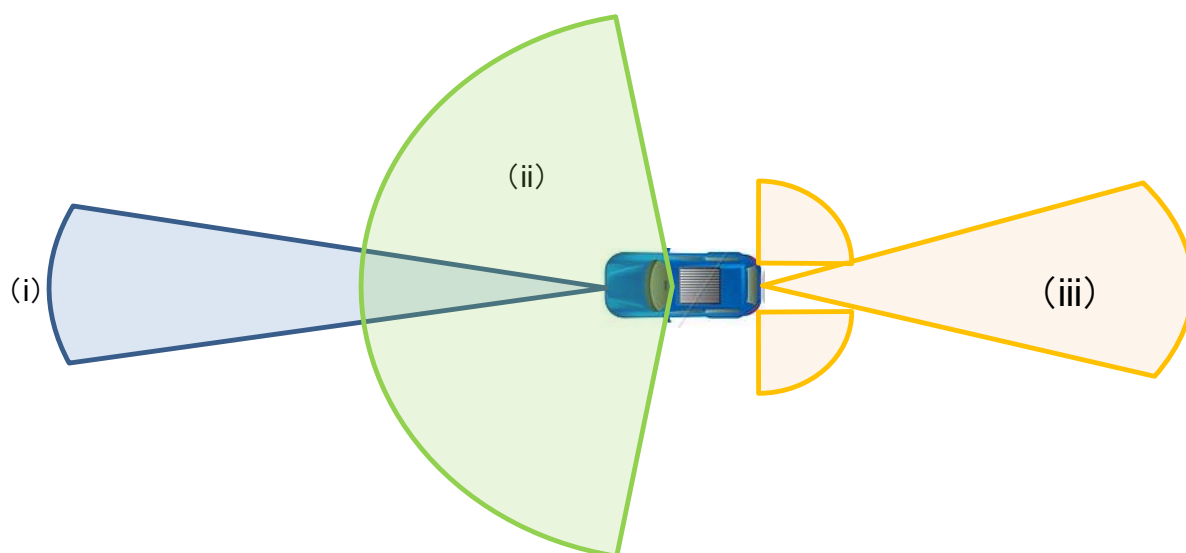
以下に自動走行システムエージェントの①知覚、②認知、③判断、④操作 処理を示す。

①知覚（センサ）性能は、平成 28 年度スマートモビリティシステム研究開発・実証事業「安全設計技術の開発」²⁻³⁾にて導出された自動走行に係る周辺環境認識目標性能を参考にした。③判断は本事業で採用しているドライバエージェントの「ミスのない模範ドライバモデル」を適応した。

① 自動走行システムエージェントの知覚処理

自動走行システムエージェントの知覚処理は、センサによる対象物のセンシング処理とする。前述通り平成 28 年度スマートモビリティシステム研究開発・実証事業「安全設計技術の開発」にて導出した自動走行に係る周辺環境認識目標性能を参考に、本事業でのセンサ仕様を決定した。

図 2.2.2-5 に本事業で模擬するセンサ仕様を示す。



No.	名称	本事業での設定値		設定可能範囲	
		認識距離	視野角度	設定距離	設定角度
(i)	前方長距離	160[m]	20[°]	1~160[m]	1~20[°]
(ii)	前方周辺	80[m]	160[°]	0~80[m]	1~160[°]
(iii)	後方認識	近接部 10[m]	90[°]	0.2~100[m]	1~90[°]
		後方確認 90[m]	30[°]		

図 2.2.2-5 自動走行システムセンサイメージ図

認識距離ならびに視野角度はパラメータで自由に設定でき、また、センサも複数設定できる。

② 自動走行システムエージェントの認知処理

ドライバエージェントと同様の認知処理を行う、ドライバエージェントの場合は視野角に制限があり、同時にすべての周辺環境を認知することはできないが、自動走行システムエージェントの場合は、センシング範囲を同時にすべて認知することができる。

③ 自動走行システムエージェントの判断処理

判断処理は、知覚・認知した周辺の交通状況に基づき、車両制御を行うための目標値（希望速度、目標停止位置、目標横変位量）を算出する。

また、車線変更の必要性を判断し、走行車線の管理・更新を行う。自動走行システムエージェントの判断能力については、ドライバエージェントにおけるミスのない模範ドライバモデルで代用する。

ここで模範ドライバ相当の属性は $(A,B,C,D,E) = (3,2,3,3,3)$ として設定した。

ただし、模範ドライバ相当の属性により算出された希望速度が法定速度を超過する場合は、道路に設定されている法定速度を希望速度とする。

④ 自動走行システムエージェントの操作処理

ドライバエージェントではドライバ属性により反応時間、ペダル踏み替え遅れ時間が定義されているが、自動走行システムエージェントの場合は、それらの遅延時間をゼロとして操作処理を行う。ただし、システム動作遅延時間は、パラメータとして設定できる。

(3) 車両オブジェクトの開発

平成 29 年度開発の交通環境再現型シミュレーションでは、シミュレーション上で表現するオブジェクト数が、平成 28 年度に対し飛躍的に増加するため、処理負荷低減を目的とし、車両オブジェクトの車両モデル（運動方程式）の簡略化を行った。

平成 29 年度開発の交通環境再現型シミュレーションにおいては、交通流の中で車両への操舵、アクセル、ブレーキ入力、それほど大きな高周波成分を含まないこと、また非線形運動領域に入ることが無いため、運動方程式の支配的要因のみを積分する車両モデルを採用する。

図 2.2.2-6 に車両モデルの座標系を示す。平成 29 年度の車両モデルにおいてはアクセル操作量を δ_A 、ブレーキ操作量を δ_B 、ハンドル操作量を δ_{sw} とする。また、車両の速度を V 、ヨーレートを r 、ヨー角を Ψ 、車両重心位置の座標を (X_v, Y_v) とする。座標系は、右手直交系として、反時計回りをヨー角の正方向とする。

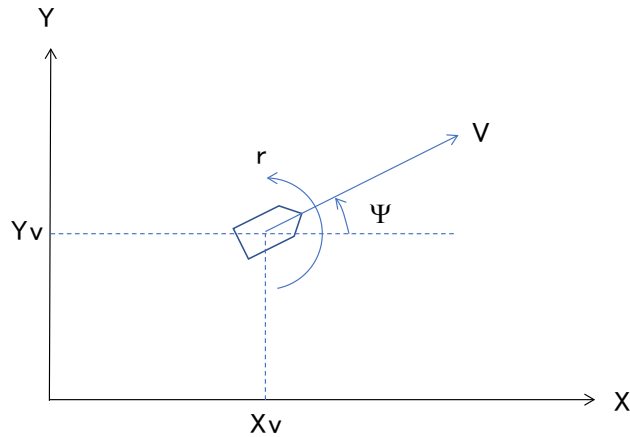


図 2.2.2-6 車両モデルの座標系

車両モデルを、以下の微分方程式で与える。

$$\dot{V} = a_v = a_A - a_B = K_{\text{long}}(\delta_A - \delta_B)$$

$$\dot{\Psi} = r = K_{\text{lat}} \delta_{sw}$$

$$\dot{X} = V \cos(\Psi)$$

$$\dot{Y} = V \sin(\Psi)$$

ここで、 K_{long} は、入力であるアクセル操作量 δ_A とブレーキ操作量 δ_B が、ともに0~9.8の範囲を取り、単位は $[\text{m/s}^2]$ であるとして、 $K_{\text{long}} = 9.8[\text{m/s}^2]$ とする。 K_{lat} については、本来は車速 V とともに変化するが、ドライバの操舵制御内でその補償制御が行われており、見かけ上その変化は打ち消されていると考え、本車両モデルでは一定値とする。その値は、右左折するときハンドルを 90° 切って、約3秒ほどで 90° 旋回することを考えると、ヨーレートは $90/3 = 30^\circ/\text{s}$ であるから、 $K_{\text{lat}} = 30^\circ/\text{s} / 90^\circ = 0.33[1/\text{s}]$ とする。ハンドル操作量の単位はヨー角の \sin, \cos を取る必要があることから、 $[\text{rad}]$ とする。表 2.2.2-1 に車両モデルの入力とパラメータを示す。

表 2.2.2-1 車両モデルの入力とパラメータ

変数	意味	値/単位
δ_A	アクセル操作量 (ドライバモデルからの出力)	0 ~ 9.8 $[\text{m/s}^2]$
δ_B	ブレーキ操作量 (ドライバモデルからの出力)	0 ~ 9.8 $[\text{m/s}^2]$
δ_{sw}	ハンドル操作量 (ドライバモデルからの出力)	-1.57 ~ 1.57 $[\text{rad}]$
K_{long}	車両前後方向ゲイン	9.8 $[\text{m/s}^2]$
K_{lat}	車両横方向ゲイン	0.33 $[1/\text{s}]$

また、車両モデルの積分間隔は 0.1 [sec] とする。オイラー法により数値積分を行う。

2.2.3 歩行者エージェントモジュールの開発

本項では、歩行者事故を再現させるために必要な、道路地図上の歩行者パス定義、歩行者エージェントの生成、歩行経路の選択決定、横断可能な道路における横断行動など歩行者エージェントの行動内容について述べる。横断を開始する時の安全確認行動と、横断する時の歩行速度および道路に対する横断角度の決定には、平成 28 年度に開発した歩行者エージェントモデルパラメータを用いる²⁻⁴⁾。また、歩行者と自動車との衝突事故を再現するため、歩行者エージェントにはある確率で安全確認を行わずに飛び出す行動を実装した。なお、平成 29 年度に歩行者エージェントモデルの改良（歩行者エージェントモデルのパラメータに年齢との相関を追加）を行うため、歩行者エージェントモデルの改良による修正が極力発生しないようにモジュール構造の設計を行った。

(1) 歩行者エージェントの生成

歩行者エージェントには、出場ノード（出場点）から出場する時に、歩行者エージェントモデルのパラメータを設定する。以下の図 2.2.3-1 と表 2.2.3-1 に示す、自由横断時の横断速度、横断角度、車両近接時の横断速度、横断角度の分布に基づいてランダムサンプリングした値が割り付けられる。性別、年齢に関してはドライバモデル生成時の分布を歩行者モデルにおいても適応する²⁻⁵⁾。

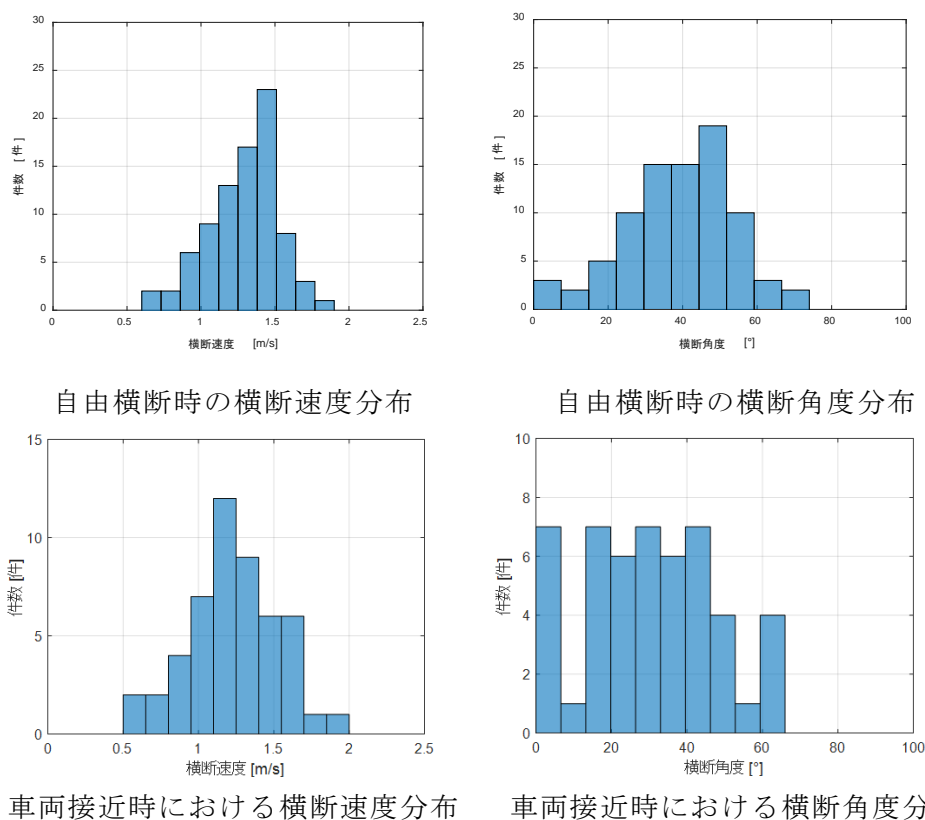


図 2.2.3-1 歩行者の横断速度、横断角度の分布

表 2.2.3-1 横断速度、横断角度の平均値と標準偏差

自由横断時	横断速度	平均値：1.30 [m/s] 標準偏差：0.23 [m/s]
	横断角度	平均値：39.7 [°] 標準偏差：14.4 [°]
車両接近時	横断速度	平均値：1.37 [m/s] 標準偏差：0.32 [m/s]
	横断角度	平均値：32.1 [°] 標準偏差：17.0 [°]

(2) 歩行者エージェント経路の生成

歩行者エージェントの歩行経路は、出場地点から退場地点までの最短経路探索により決定する。また歩行者エージェントは、出場から退場までの間に1回のみ横断行動を行うこととする。歩行者エージェントが車道を横断するかどうかの判定は、道路幅員（対向する歩行者パス間の距離）によって決定する。この距離（幅）の判定値は可変である。現状では道路幅員が9[m]以下の場合に横断が発生する可能性があるとする（図 2.2.3-2 における生活道路エリアに対応）。

現状、歩行者エージェントが横断開始しようとする位置は図 2.2.3-2 に示すように、横断開始位置をランダムに決定する。歩行者エージェントはランダムに決められた地点から横断行動を開始するが、安全確認行動により横断を行わなかった場合は最初に決定した経路に従い、通常の歩行を再開する。これ以降新たな横断行動は行わない。

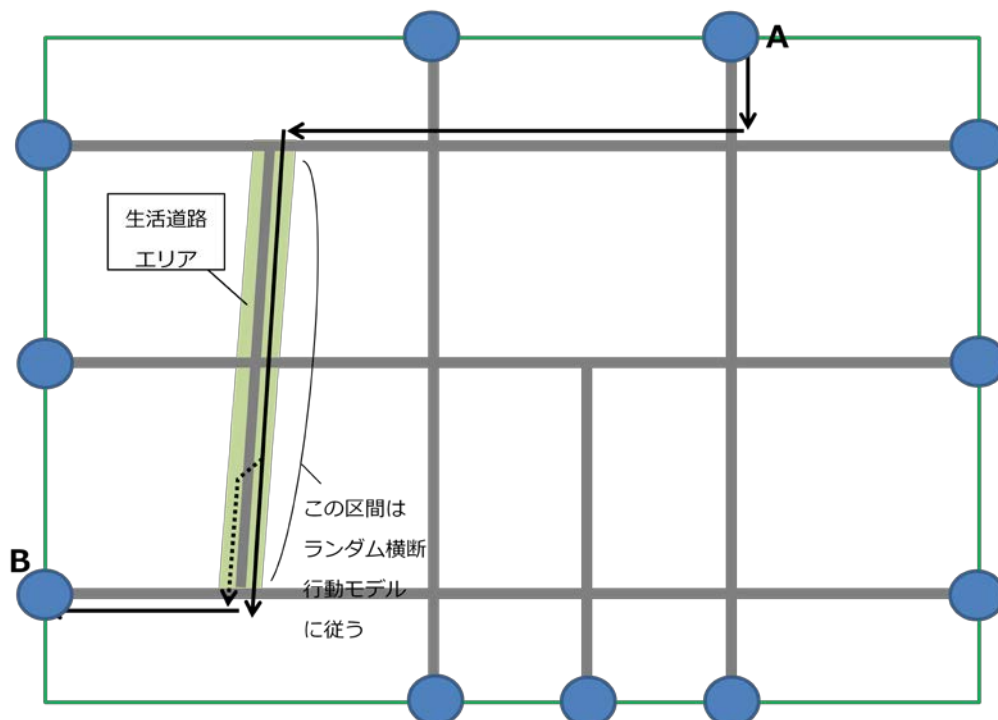


図 2.2.3-2 横断可能な道路の限定（生活道路エリア：道路幅員が9[m]以下）

(3) 歩行者エージェントの歩行速度、停止行動

歩行者エージェントの歩行速度は、歩行者エージェント生成時に決定した値を使用する。歩行者エージェントは決められた歩行速度で歩行者パス上を歩行し、停止に関しては止まると判断した時点で停止する。

(4) 歩行者エージェントの歩行行動

各歩行者エージェントは、出場時に決定された経路上の歩行者パスを歩行する。同一歩行者パス上に複数の歩行者エージェントが存在する場合、各歩行者を歩行者パスに対してオフセットを持つように定義し、歩行者エージェントが極力オーバーラップしないようにする。

(5) 歩行者エージェントの安全確認行動

歩行者エージェントが歩行者パスを歩行中は安全行動は行わない。ただし、交差点においては信号を確認し、信号に従った行動をとる。また、単路部を横断するときは、表 2.2.3-2 に示す安全確認行動を行う。ただしある確率で安全確認行動をスキップするようにして、飛び出し行動を再現した。横断を開始するかどうかは、車両との TTC によって判断する。

「横断を断念した歩行者と横断した歩行者の TTC の分布」から「横断を開始する TTC の閾値の分布」を求める。まずは、横断を断念した歩行者と横断した歩行者の TTC の分布から横断する確率を求め、その横断する確率の TTC の変化による変動量、即ち、「横断をしない」から「横断する」に変化した量を算出することで、横断を開始する TTC の閾値の分布が得られると考えられる。横断する確率の算出式を以下に示す。

$$\frac{\text{横断した歩行者}}{\text{横断を断念した歩行者} + \text{横断した歩行者}} \times 100 \quad (1)$$

上記式 (1) によって算出した「横断する確率の分布」と、この横断する確率を微分することで「横断を開始する TTC の閾値の分布」を図 2.2.3-3 に示す。またこの分布は図 2.2.3-4 に示すように対数正規分布により近似できるため、この分布を用いたランダムサンプリングにより横断開始の TTC 閾値を決定する。

表 2.2.3-2 横断時に安全確認を行う場合の確認方法と確率

横断前	立ち止って安全確認する確率	23[%]
	歩きながら安全確認する確率	77[%]
横断中	横断中に首振り確認をする確率	30[%]

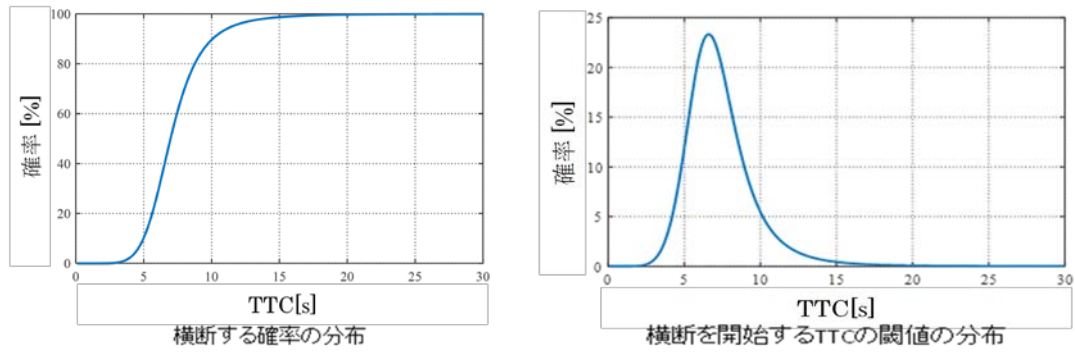


図 2.2.3-3 横断開始の判断に使用する分布データ

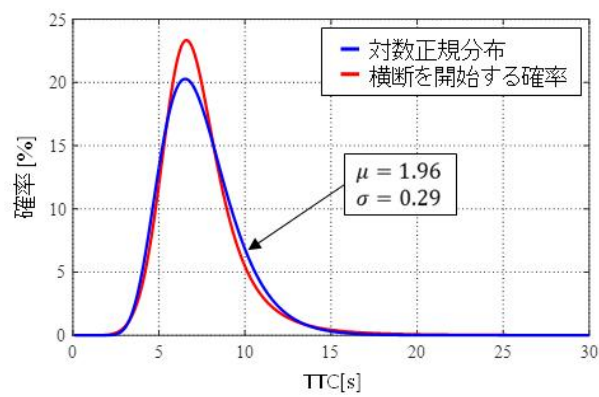


図 2.2.3-4 対数正規分布による近似

(6) 歩行者と車両接触判定

歩行者と車両の接触判定は、車両の大きさのみを考慮した判定とする。具体的には、歩行者の座標が車両形状を与える四角形の内部にあるかどうかで検出する。

図 2.2.3-5 に、歩行者パスの設定例を示す。



地図データ @2018 Google,ZENRIN

図 2.2.3-5 歩行者パスの設定例

今回開発した交通環境再現型シミュレーションにおいて、歩行者エージェントの安全確認行動のスキップによる飛び出しにより、歩行者と車両との衝突事故が発生することを確認した。

2.2.4 道路管理モジュールの開発

道路管理モジュールとは、個々のドライバエージェントが走行経路、速度、走行車線選択、車線変更などを判断するために必要な情報を道路情報に紐付けし管理するものである。

平成 29 年度開発のシミュレーションを実行するために必要な情報を、道路エディタより出力される道路データファイル、OD ファイルから読み込み、シミュレーション管理モジュールで利用できるようにデータ変換する。以下に内部形式への変換と情報の紐付け方法を示す。

(1) シミュレーション内部形式への変換

道路エディタでは多くのデータを配列として扱っている。たとえば、道路データファイルの道路の形状を表す X,Y,Z 座標は、以下のような形式で、X,Y,Z の値が Param3, Param4, Param5 に分割して書かれている。

```
PathParam3 : 0   318.75  315.9   312.993 310.114  ...
PathParam4 : 0   298.25  298.535 299.378 300.746  ...
PathParam5 : 0   0       0       0       0       ...
```

これを 3 次元データ (318.75, 298.25,0)、(315.9, 298.535,0)、・・・のように変換した。

また、シミュレーションでは座標を point3d 形式 (X,Y,Z 座標を持つクラス) として表現するため、point3d 型のベクトルとして扱えるように型変換する。同様に、道路エディタのベクトルもすべてシミュレーション内部形式の vector3d 形式 (X,Y,Z 座標を持つベクトル) に変換した。

(2) 内部構造への紐付け方法

シミュレーション高速化のために内部構造に紐付けた追加情報の詳細を説明する。これらは、シミュレーションの開始時にレシピファイルに書かれたデータと道路エディタから出される道路データファイル、OD ファイルを読み込み、一括してシミュレーション内部形式に変換した後、以下に示す①～⑧の追加情報を作成する。これらの情報は、主にシミュレーションメインルーチンや GUI でのシミュレーション状況の描写で使用する。

① パス外形図の作成

道路エディタでは、道路形状は中心線と道路幅で表現される。シミュレーションではこれらのデータを収集した後、パス形状として gpolygon (3D 座標で表現する多角形) に変換し、内部保管する。このパス形状は GUI 画面で道路を表示するのに利用される。また、この道路や歩道を表す多角形から車両がはみ出したとき逸脱事故とするために使用することが可能である。

② コーナーの曲率と、速度の計算

パス情報から、コーナーの曲率を計算する。さらに、曲率から各コーナーの希望速度を予め計算し内部保管する。

③ パス ID テーブルの作成

道路エディタのパス ID は飛び飛びの値で指定される。パス ID からデータ配列情報を引き出すためには、配列内のパス ID を検索する必要がある。そこで、予めパス ID から配列の添字の変換テーブルを用意しておき、テーブル参照によりパス ID から添字番号の変換を行い、シミュレーションの高速化を図った（図 2.2.4-1 参照）。

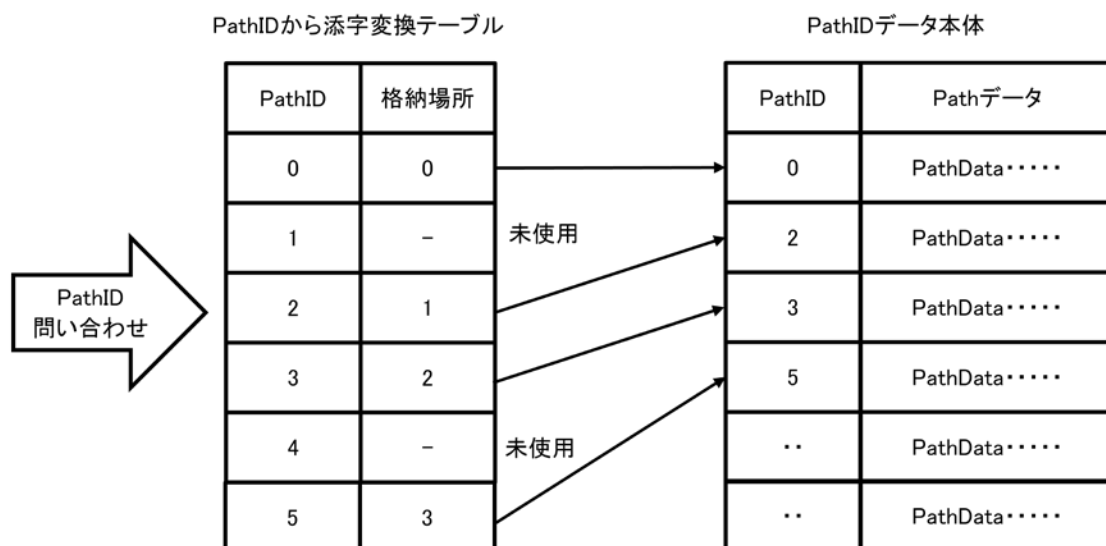


図 2.2.4-1 添字変換テーブル

④ 交差点内の DirectionMap に関する作りこみ

道路エディタではノード内の道路の接続状況と、各道路の向きを分離して管理している。ただ、そのままでは交差点通過する際の右折、左折、直進をすぐに取得することができない。そこで道路エディタから出力される DirectionMaps 構造体を各ノードに持たせ、進入、進出方向を割り出せるようにした。このことにより進入ウェイポイント、進出ウェイポイントを与えると直進、右折、左折しているかを判断できる。

⑤ ノード内のパスについて

車両エージェントはその車両が走行を予定しているパス一覧を用い、これから向かうパスがノード内を直進・右折・左折するパスかノード間のパスかを判断する必要がある。そこで、ノード内にあるパスに対して、そのパスの、進入ウェイポイント、進出ウェイポイントの方向を調べてこのパスが直進、右折、左折いずれに該当するかで判断している。その他の場合は、ノード間のパスとしている。

⑥ パスと停止線の結合

道路エディタは、パスと停止線を別管理している。シミュレーションではパスデータの内部構造に停止線情報を保持して一括管理する。単一のパスに複数の停止線が存在する場合があるので、停止線情報は可変長配列で保持する。この際以下の情報を付加する。

(i) パス先頭から停止線までの距離

この距離を用い、停止線までの距離 = パス先頭から停止線までの距離 - 自己位置とすると、停止線までの距離が求められる。

(ii) 信号停止線と信号機の結合

平成 29 年度開発のシミュレーションでは、パスデータ内に格納している信号停止線の付加情報として、予め停止線を支配している信号機 ID を持たせる。この情報により、車両エージェントは自身が走行しているパスに含まれる信号停止線を見つけ、その信号停止線を支配する信号機を検索することで、高速化が計られている。

⑦ 交錯情報の拡張

道路エディタから得られる交錯位置（パスが交錯している個所）に以下の情報を付加している。図 2.2.4-2 に交錯情報の例を示す。図中の菱形部分が交錯点となる。道路エディタからはこの交錯点は Path2 の上にあり、その座標は (x,y,z) で、交差するパスは Path10 という情報が返却される。これに加え、シミュレーションは追加情報としてこの交錯点に流入するパスを Path10 から再帰的に検索し、Path9、Path8、Path7、Path6 と辿って探査する。シミュレーションは交錯点から 500[m]の範囲で再帰的に流入パスを探査し、流入予定パス ID を交錯点情報として保持する。パス情報に含まれる交錯点情報から流入予定パス ID を取得し、近くで検知した他車の走行パス ID と比較し、一致した場合その車両は交錯点で自車と衝突する可能性がある車両と判断する。

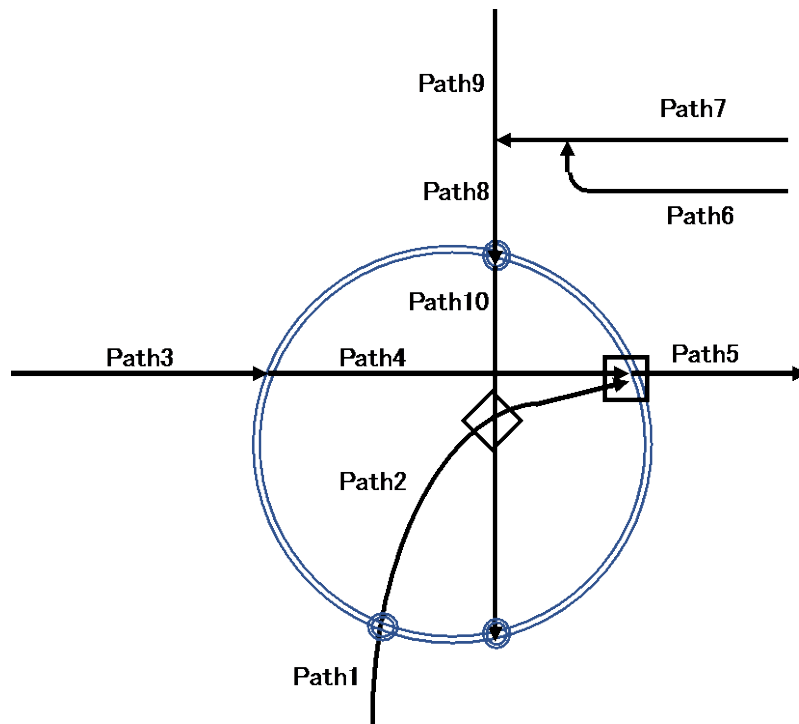


図 2.2.4-2 交錯情報の拡張

⑧ 交錯点の追加

道路エディタでは、先の図 2.2.4-2 において四角で示した位置は「交錯点」として扱わず、シミュレーション中にリアルタイムに「合流点」として地図から動的に探査する。しかしこの位置も「交錯点」として統一して扱えば、衝突判定が他の交錯点と同時に行える。シミュレーションは地図データ変換時、四角の位置関係にある合流点を探査し、交錯点としてパス情報に追加する。

2.2.5 ログ出力モジュールの開発

ログ出力として、それぞれの交通参加者の位置情報、移動速度、操舵角、加減速値と事故発生地点を定義する。また、各ドライバの短期記憶情報（処理対応の車両情報、判断基準（TTC）など）を定義し出力する。

ログファイルは ASCII-Text（SHIFT-JIS）で保存する。各行は“,”で区切られた数値、もしくは文字列で複数の項目を保存する。以下にログの詳細を示す。

166,001.80	Veh,0.6	(1)	@POS,-680.28,-1.86,0.00, 16.43,0.41,0.00, Path,72,25,27.93, A/B/S,0.51,-0.00,0.01,Wink,0
171,001.70	Drv,2.8	(4)	@DINF1 Sex,1, Age,65, Wt,60.00, [A-E],2,1,1,2,1
172,001.70	Veh,2.8	(4)	@VINF1 maxa,3.83, minA,10.00, Wt,1450.00,60.00, idleA,-0.25, vtype,0, auto,0
175,001.70	Drv,1.6	(4)	@JDGE,-R+S-F, lin, ttc,6.376, kibou, 16.667, wa, -0.3,wb,0.0 st,-2.0, oa,-0.3,ob, 0.0 ,ERR:F
176,001.70	Drv,2.8	(4)	@INF, W,1.780, freeAcc,-0.250, [ABCDE],1,3,2,4,1, minDist,4.000, maxDec,5.884, BRT/ART,0.560,0.578, Bet
178,001.70	Drv,0.6	(4)	@JDGE,-R+S-F, lin, ttc,12.451, kibou, 16.667, wa, 0.5,wb,0.0 st,0.3, oa,0.5,ob, 0.0 ,ERR:F
180,001.70	Drv,2.8	(4)	@JDGE,-R-S-F, env, ttc,4294967295.000, kibou, 16.667, wa, 0.0,wb,5.9 st,0.6, oa,-0.3,ob, 0.0 ,ERR:F
181,001.70	Veh,1.6	(1)	@POS,684.88,34.12,0.00, -16.04,-2.71,0.00, Path,91,146,29.41, A/B/S,-0.25,-0.00,-0.03,Wink,0
183,001.70	Veh,0.6	(1)	@POS,-678.64,-1.82,0.00, 16.46,0.41,0.00, Path,72,25,29.57, A/B/S,0.53,-0.00,0.00,Wink,0
182,001.70	Veh,2.8	(1)	@POS,-706.54,-6.17,0.00, 16.64,0.35,0.00, Path,73,92,1.67, A/B/S,-0.25,-0.00,0.01,Wink,0
187,001.80	Drv,3.4	(4)	@DINF1 Sex,0, Age,25, Wt,60.00, [A-E],1,3,2,4,1
188,001.80	Veh,3.4	(4)	@VINF1 maxa,3.83, minA,10.00, Wt,1450.00,60.00, idleA,-0.25, vtype,0, auto,0
193,001.80	Drv,1.6	(4)	@JDGE,-R+S-F, lin, ttc,6.286, kibou, 16.667, wa, -0.3,wb,0.0 st,-2.0, oa,-0.3,ob, 0.0 ,ERR:F
194,001.80	Drv,2.8	(4)	@JDGE,-R-S-F, non, ttc,999.000, kibou, 16.667, wa, -0.3,wb,0.1 st,0.5, oa,-0.3,ob, 0.0 ,ERR:F
196,001.80	Drv,3.4	(4)	@INF, W,2.500, freeAcc,-0.250, [ABCDE],1,3,2,4,1, minDist,4.000, maxDec,5.884, BRT/ART,0.333,0.348, Bet
197,001.80	Drv,0.6	(4)	@JDGE,-R+S-F, lin, ttc,12.311, kibou, 16.667, wa, 0.5,wb,0.0 st,0.2, oa,0.5,ob, 0.0 ,ERR:F
199,001.80	Drv,3.4	(4)	@JDGE,-R+S-F, lin, ttc,7.882, kibou, 16.667, wa, 0.0,wb,5.9 st,-2.2, oa,-0.3,ob, 0.0 ,ERR:F
200,001.80	Veh,3.4	(1)	@POS,712.30,34.98,0.00, -16.38,-2.93,0.00, Path,90,14,1.67, A/B/S,-0.25,-0.00,-0.04,Wink,0
202,001.80	Veh,0.6	(1)	@POS,-676.99,-1.78,0.00, 16.54,0.42,0.00, Path,72,25,31.22, A/B/S,0.53,-0.00,0.00,Wink,0
201,001.80	Veh,2.8	(1)	@POS,-704.88,-6.14,0.00, 16.61,0.35,0.00, Path,73,92,3.33, A/B/S,-0.25,-0.00,0.01,Wink,0
203,001.80	Veh,1.6	(1)	@POS,683.08,33.85,0.00, -16.01,-2.68,0.00, Path,91,146,31.04, A/B/S,-0.25,-0.00,-0.04,Wink,0
209,001.90	Drv,2.8	(4)	@JDGE,-R-S-F, non, ttc,999.000, kibou, 16.667, wa, -0.3,wb,0.1 st,0.5, oa,-0.3,ob, 0.0 ,ERR:F
208,001.90	Drv,1.6	(4)	@JDGE,-R+S-F, lin, ttc,6.195, kibou, 16.667, wa, -0.3,wb,0.0 st,-2.0, oa,-0.3,ob, 0.0 ,ERR:F
212,001.90	Drv,3.4	(4)	@JDGE,-R+S-F, lin, ttc,7.794, kibou, 16.667, wa, 1.6,wb,0.0 st,-1.9, oa,1.6,ob, 0.0 ,ERR:F
213,001.90	Drv,0.6	(4)	@JDGE,-R+S-F, lin, ttc,12.172, kibou, 16.667, wa, 0.5,wb,0.0 st,0.5, oa,0.5,ob, 0.0 ,ERR:F
214,001.90	Veh,0.6	(1)	@POS,-675.34,-1.74,0.00, 16.59,0.42,0.00, Path,72,25,32.67, A/B/S,0.52,-0.00,0.01,Wink,0
215,001.90	Veh,3.4	(1)	@POS,710.67,34.68,0.00, -16.54,-2.94,0.00, Path,90,14,3.33, A/B/S,1.58,-0.00,-0.03,Wink,0
216,001.90	Veh,1.6	(1)	@POS,681.46,33.58,0.00, -15.99,-2.66,0.00, Path,91,146,32.66, A/B/S,-0.25,-0.00,-0.03,Wink,0
217,001.90	Veh,2.8	(1)	@POS,-703.22,-6.10,0.00, 16.59,0.36,0.00, Path,73,92,4.99, A/B/S,-0.25,-0.00,0.01,Wink,0
223,002.00	Drv,2.8	(4)	@JDGE,-R-S-F, non, ttc,999.000, kibou, 16.667, wa, -0.3,wb,0.1 st,0.5, oa,-0.3,ob, 0.0 ,ERR:F
222,002.00	Drv,1.6	(4)	@JDGE,-R+S-F, lin, ttc,6.109, kibou, 16.667, wa, -0.3,wb,0.0 st,-1.9, oa,-0.3,ob, 0.0 ,ERR:F
224,002.00	Drv,0.6	(4)	@JDGE,-R+S-F, lin, ttc,12.034, kibou, 16.667, wa, 0.5,wb,0.0 st,0.6, oa,0.5,ob, 0.0 ,ERR:F
227,002.00	Drv,3.4	(4)	@JDGE,-R+S-F, lin, ttc,7.622, kibou, 16.667, wa, 1.6,wb,0.0 st,-2.0, oa,1.6,ob, 0.0 ,ERR:F
228,002.00	Veh,1.6	(1)	@POS,679.86,33.32,0.00, -15.97,-2.64,0.00, Path,91,146,34.28, A/B/S,-0.25,-0.00,-0.03,Wink,0
229,002.00	Veh,0.6	(1)	@POS,-673.68,-1.89,0.00, 16.64,0.43,0.00, Path,72,25,34.53, A/B/S,0.52,-0.00,0.01,Wink,0
230,002.00	Veh,3.4	(1)	@POS,709.01,34.39,0.00, -16.70,-2.95,0.00, Path,90,14,5.01, A/B/S,1.58,-0.00,-0.04,Wink,0
231,002.00	Veh,2.8	(1)	@POS,-701.56,-6.07,0.00, 16.56,0.36,0.00, Path,73,92,6.65, A/B/S,-0.25,-0.00,0.01,Wink,0
236,002.10	Drv,1.6	(4)	@JDGE,-R+S-F, lin, ttc,6.014, kibou, 16.667, wa, -0.3,wb,0.0 st,-2.2, oa,-0.3,ob, 0.0 ,ERR:F
237,002.10	Drv,2.8	(4)	@JDGE,-R-S-F, non, ttc,999.000, kibou, 16.667, wa, -0.3,wb,0.1 st,0.4, oa,-0.3,ob, 0.0 ,ERR:F
240,002.10	Drv,3.4	(4)	@JDGE,-R+S-F, lin, ttc,7.451, kibou, 16.667, wa, 1.6,wb,0.0 st,-1.8, oa,1.6,ob, 0.0 ,ERR:F
241,002.10	Drv,0.6	(4)	@JDGE,-R+S-F, lin, ttc,11.897, kibou, 16.667, wa, 0.5,wb,0.0 st,0.6, oa,0.5,ob, 0.0 ,ERR:F
245,002.10	Veh,3.4	(1)	@POS,707.34,34.10,0.00, -16.86,-2.95,0.00, Path,90,14,6.71, A/B/S,1.56,-0.00,-0.03,Wink,0
244,002.10	Veh,1.6	(1)	@POS,678.28,33.05,0.00, -15.95,-2.61,0.00, Path,91,146,35.90, A/B/S,-0.25,-0.00,-0.04,Wink,0
242,002.10	Veh,2.8	(1)	@POS,-699.90,-6.03,0.00, 16.54,0.36,0.00, Path,73,92,8.31, A/B/S,-0.25,-0.00,0.01,Wink,0
243,002.10	Veh,0.6	(1)	@POS,-672.02,-1.65,0.00, 16.69,0.44,0.00, Path,72,25,36.20, A/B/S,0.51,-0.00,0.01,Wink,0
250,002.20	Drv,0.6	(4)	@JDGE,-R+S-F, lin, ttc,5.923, kibou, 16.667, wa, -0.3,wb,0.0 st,-2.3, oa,-0.3,ob, 0.0 ,ERR:F
251,002.20	Drv,2.8	(4)	@JDGE,-R-S-F, non, ttc,999.000, kibou, 16.667, wa, -0.3,wb,0.1 st,0.4, oa,-0.3,ob, 0.0 ,ERR:F
255,002.20	Drv,0.6	(4)	@JDGE,-R+S-F, lin, ttc,11.761, kibou, 16.667, wa, 0.5,wb,0.0 st,0.6, oa,0.5,ob, 0.0 ,ERR:F
254,002.20	Drv,3.4	(4)	@JDGE,-R+S-F, lin, ttc,7.284, kibou, 16.667, wa, 1.5,wb,0.0 st,-1.8, oa,1.5,ob, 0.0 ,ERR:F

1) 2) 3) 4) 5) 6)

図 2.2.5-1 ログ出力ファイルイメージ

図 2.2.5-1 に示すようにログ出力ファイルに、各種ログ情報を保存する。保存されるログデータの内容は、データ部先頭の文字列で識別する。1) 行番号～2) ログモードまでをヘッダ部、それ以降の 6) ログデータ本体をデータ部とする。すべての行は共通のヘッダ部を持つ。

【ログ出力フォーマット】

行番号,Sim 時間,発行元,AgentNo,タイプ,ログモード,[ログデータ本体]

- 1) 行番号：ログ開始からの連番。
- 2) Sim 時間：シミュレーション時刻。複数の Agent が動作する場合、同一のシミュレーション時刻に複数のログが存在する。
- 3) 発行元：Drv:ドライバクラス Veh:車両クラス 等。
- 4) AgentNo：シミュレーション開始から Agent 一台ごとにつけられた連番。
タイプ：車両、ドライバに割り当てた通番。
レシピファイルで指定した通番と一致する。
- 5) ログモード：ユーザ未使用、プログラム開発にて使用。
- 6) ログデータ本体：データ部の種類は表 2.2.5-1 に示す通りである。

(1) 以降にデータ部の詳細を述べる。

表 2.2.5-1 : ログの種類

	ログの種類	内容	発行元
(1)	@INF, @Exp	使用ファイル・実験名情報	シミュレーション管理モジュール
(2)	TSignal	信号機状態ログ	シミュレーション管理モジュール
(3)	@KIL	事故発生ログ	シミュレーション管理モジュール
(4)	@DINF1	ドライバ個人特性ログ	ドライバエージェント
(5)	@INF	ドライバ運転特性ログ	ドライバエージェント
(6)	@JDGE	「判断」ログ	ドライバエージェント
(7)	@VIN1	車両特性ログ	車両オブジェクト
(8)	@POS	車両関係ログ	車両オブジェクト

(1) @INF, @Exp シミュレーション条件ログ

シミュレーション起動時に一度だけ保存されるログ。シミュレーションの起動条件が記述される。この情報で、どの地図情報を使い、レシピファイル名は何を使ったかなどを確認できる。

① @INF 使用ファイル情報

【ログ発行元】シミュレーション管理モジュール

【フォーマット】

@INF ログ保存パス、道路データファイル名、OD 表ファイル名、レシピファイル名

(i) ログ保存パス : ログファイルを保存するパスを記載する。

(ii) 道路データファイル名 : 地図ファイル名とその更新日時、
ファイルサイズ

(iii) OD 表ファイル名 : OD 表を保存したファイル名とその更新日時、
ファイルサイズ。

(iv) レシピファイル名 : CSV ツールが出力したレシピファイル名と
その更新日時、ファイルサイズ。

② @Exp 実験名情報

【ログ発行元】シミュレーション管理モジュール

【フォーマット】

@Exp シミュレーション実験名称

(i) シミュレーション実験名称 : レシピファイルで指定した実験名称。

(2) TSignal 信号機状態ログ

信号機の状態を示す。シミュレーション開始時に全信号機の状態が保存され、それ以降信号機の現示が変わったタイミングでログ化する。

【ログ発行元】 シミュレーション管理モジュール

【フォーマット】

TSignal 信号 ID、継続時間、現示パターン

- (i) 信号 ID : 道路地図情報で定義されている信号 ID
- (ii) 継続時間 : 後半に示された現示パターンを継続する秒数 [sec]
- (iii) 現示パターン : シミュレーション内部表記の現示パターン
表 2.2.5-2 に現示パターンの意味を示す。

表 2.2.5-2 : 現示パターンの表記

表示	意味
G、Y、R	青、黄、赤信号
La、Sa、Ra	左矢印、直進矢印、右矢印
Yf、Rf	黄点滅、赤点滅

(3) @KIL 事故発生ログ

@KIL は事故が発生したことを表す。@KIL は 3 行 (2 種類) 情報を出力する。

① @KIL 1 行目

事故が発生した対象を表示する。

【ログ発行元】 シミュレーション管理モジュール

【@KIL 1 行目フォーマット】

@KIL ID[ID1] 車両::vs:: ID [ID2]

- (i) ID1 : 事故を起こした AgentID
- (ii) ID2 : 事故を起こした AgentID

② @KIL 2、3 行目

事故が発生した時点の車両状態を出力する。このログは衝突した双方の情報を示すために 2 行に分かれる。

【ログ発行元】 シミュレーション管理モジュール

【@KIL 2、3 行目フォーマット】

@KIL ID、X,Y,Z、Dr[X,Y,Z]、Hd[X,Y,Z]、Acc、BRK、Ste、BRK_ON/BRK_OFF、
Safes、pols

- (i) ID : 車両 AgentID
- (ii) X,Y,Z : 事故発生時の車両重心座標。座標系は東西が X (東が+)、
南北が Y (北が+)
- (iii) Dr[X,Y,Z] : 事故発生時の車両進行方向ベクトル[m/s]
- (iv) Hd[X,Y,Z] : 事故発生時の車両の向きベクトル[m/s]
- (v) Acc : 車両のアクセル設定値[m/s²] (ドライバからの指示値に対し
ART をもとに調整し最大加速度と比較して最終決定された操作量)
- (vi) BRK : 車両のブレーキ設定値[m/s²] (ドライバからの指示値に対し

- BRT をもとに調整し最大減速度と比較して最終決定された操作量)
- (vii) Ste : ステアリング設定値[°] (ドライバからの指示値と等価)
 - (viii) BRK_ON/BRK_OFF : ブレーキランプの点灯状態。
 - (ix) Safes : 安全装置発報状態
 - (x) pols : 車両ボディーの四隅の位置

(4) @DINF1 ドライバ特性ログ

Agent がシミュレーションに登場したときに一度だけ保存されるログ情報で、後の@INF (ドライバ運転特性ログ) と合わせて場に登場したドライバの特性を知ることができる。

【ログ発行元】 ドライバエージェント

【フォーマット】

@DINF Sex、Age、Wt、A-E

- (i) Sex : 性別 0:男、1:女
- (ii) Age : 年齢
- (iii) Wt : ドライバ体重[Kg]

車両の総重量は ドライバ体重 + 車両重量 で求める。

- (iv) A-E : ドライバ特性値

(5) @INF ドライバ運転特性ログ

Agent がシミュレーションに登場したときに一度だけ保存されるログ情報で、場に登場したドライバの特性を知ることができる。ここに表示される値は、主にドライバ生成時に動的に決定される値を示す。

【ログ発行元】 ドライバエージェント

【フォーマット】

@INF W、freeAcc、ABCDE、minDist、maxDec、BRT/ART、Beta、sgDif、Vopt

- (i) W : ドライバ体重[Kg]
- (ii) freeAcc : 車両空走減速度[m/s²]
- (iii) ABCDE : ドライバ特性
- (iv) minDist : 最低車間距離[m]
- (v) maxDec : ドライバ最大減速度[m/s]
ドライバが指定できる最大減速度で、実際の車両は別途「最大減速度」を持ち、それらの小さいほうで減速する。
- (vi) BRT/ART : BRT, ART 値[sec]
- (vii) Beta : ウィーダーマンロジックで使用する時間に関する車間時間[sec]²⁻⁶⁾
- (viii) sgDif : ウィーダーマンロジックで使用する希望速度[m/s²]
- (ix) Vopt : ウィーダーマンロジックで使用する希望速度分布

(6) @JDGE 「判断」ログ

ドライバ Agent の判断部の処理結果。主に「判断」部のログが中心になる。知覚エラー

発生状況もここにログが残る。

【ログ発行元】 ドライバエージェント

【フォーマット】

@JDGE 減速指示、最終判断したクラス、ttc、wa、wb、st、oa、ob

(i) 減速指示 [RSF] : R,S,F それぞれの項目で減速指示の有無を示す。

-R : 道路状況クラスの減速判断結果。道路状況クラスで減速が必要と判断した。

平成 29 年度道路状況クラスはコーナー曲率のみ判断する。

-S : 停止線管理クラスの減速判断結果。

停止線管理クラスで減速が必要と判断した。

-F : 前走車追従クラスの減速判断結果。

前走車追従クラスで減速が必要と判断した。

(ii) 最終判断したクラス [Env, lin, veh, none] :

最終的にどのモードで動作しているかを示す。

-Env : 道路状況クラスの停止が最も厳しい減速になると判断。

-lin : 停止線管理クラスの停止が最も厳しい減速になると判断。

-veh : 前走車追従クラスの停止が最も厳しい減速になると判断。

-none : 上記 3 クラスのいずれも停止を要求していないことを示す。

(iii) ttc : この秒数で衝突になる事を示す[sec]。

999.9 は衝突の可能性がない、あるいは十分遠方を示す。

(iv) kibou : 道路形状から求めた希望速度[m/s]

(v) wa : ウィーダーマンロジックが計算した加速度[m/s²]

負数の場合はエンジンブレーキ (空走減速)

(vi) wb : ウィーダーマンロジックが計算した減速度[m/s²]

負数は利用せず正の数で減速を示す。

(vii) st : ハンドル角度[°]

(viii) oa : ART 計算後の実際の加速度[m/s²]

(ix) ob : BRT 計算後の実際の加速度[m/s²]

(x) ERR:[T/F] : ドライバ知覚エラー発生中は「T」を示す。

(7) @VINF1 車両特性ログ

Agent がシミュレーションに登場したとき一度だけ保存されるログ情報で、場に登場した車両の特性を知ることができる。

【ログ発行元】 車両オブジェクト

【フォーマット】

@VINF maxa、minA、Wt、idleA、vtype、auto

(i) maxa : 車両最大加速度[m/s²]

(ii) minA : 車両最大減速度[m/s²]

(iii) Wt : 車両重量、ドライバ体重[Kg]

(iv) idleA : 車両空走減速度[m/s²]

- (v) vtype : 車両種別
- (vi) auto : 0 : 一般車両、1 : 自動走行車両

(8) @POS 車両関係のログ

車両の位置、速度などを保存する。

【ログ発行元】車両オブジェクト

【フォーマット】

@POS 車両位置、車両速度、パス情報、A/B/S 指示値、ウィンカ操作

- (i) 車両位置 : 位置 $x,y,z[m]$ 車両重心の位置を表す。
- (ii) 車両速度 : 速度 (x,y,z) $[m/s]$
- (iii) パス情報 : パス,[現在],[次],[距離[m]
 車両が乗っている[現在]のパス ID、これから侵入予定の
 [次]パス ID、現在乗っているパス先頭からの経路距離を表す。
- (iv) A/B/S 指示値 : アクセル、ブレーキ、ステアリング指示値 (A/B/S) ドライバが
 操作量として決めたアクセル操作量 $[m/s^2]$ 、ブレーキ操作量 $[m/s^2]$ 、
 ステアリング指示値 $[\circ]$ を表す。この値は「ドライバが操作量」
 として判断した値で、後に車両に伝えられ、車両特性を勘案して
 加減速に反映される。
- (v) ウィンカ操作 : ウィンカ操作指示値
 表 2.2.5-1 にウィンカ識別子の意味を示す。

表 2.2.5-1 : ウィンカ識別子の意味

値	識別子	適用
0	eNone	方向指示なし
1	eLeft	左方向指示
2	eRight	右方向指示
3	eHazard	ハザードランプ

平成 29 年度開発のシミュレーションでは、シミュレーション本体に統計情報出力機能を有していない。統計情報の出力は、シミュレーションの実行条件を指定し出力された複数のログ出力ファイルから事故発生情報を取り出し、比較する形でまとめて出力する。

平成 29 年度出力する統計情報としては、全車両、手動運転の場合の事故発生率をベースとして運転支援システムや、自動走行システムの搭載率を変化させたシミュレーション結果を比較し以下のような情報を出力する。

- ・各シミュレーションの走行距離当たりの事故件数の比較
- ・各シミュレーションの各システム毎の事故件数の比較
- ・各シミュレーションの発生事故構成比較

シミュレーションの機能確認として全車両手動運転の場合、手動運転と運転支援システム搭載車混在、さらに、2.2.2 (2) で定義した自動走行システム搭載車混在のシミュレーションを実施した。シミュレーション実施時のシナリオを図 2.2.5-2 に示す。

シナリオ

- (1)手動100%
- (2)手動50%, AEB50%
- (3)手動25%, AEB25%,
AEB+LDW50%
- (4)手動25%, AEB+LDW50%,
自動走行25%
- (5)手動25%, AEB+LDW25%,
自動走行50%
- (6)AEB+LDW25%
自動走行75%

図 2.2.5-2 シミュレーション実施時のシナリオ条件

次頁にシナリオに従い、シミュレーションを実行しログ出力ファイルを解析した。シナリオ (1) を 100 とした場合の事故低減効果を図 2.2.5-3、各シナリオにおける走行距離当たりの事故率を図 2.2.5-4、各シナリオにおける事故構成比率を図 2.2.5-5 に示す。

平成 29 年度開発のシミュレーションによる事故低減詳細効果の評価機能の確認は 4.1 節に詳細に示す。

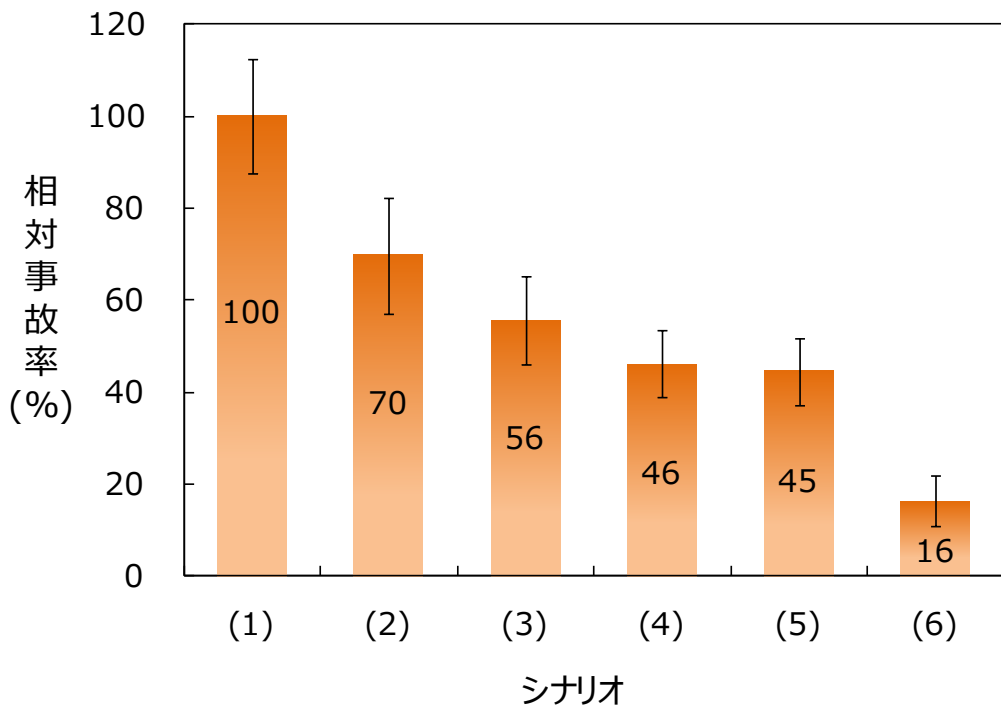


図 2.2.5-3 自動走行システム搭載による事故低減効果

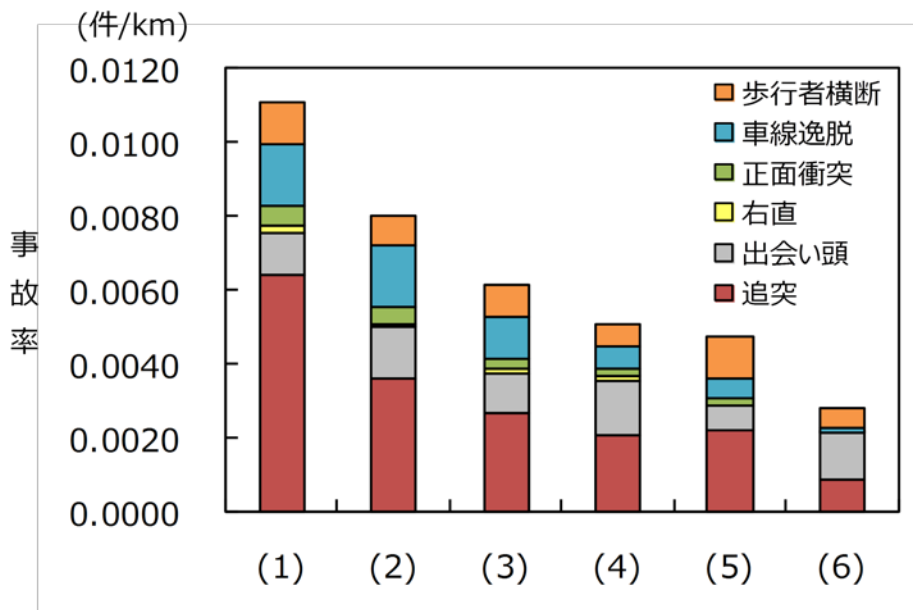


図 2.2.5-4 自動走行システム搭載毎の事故率

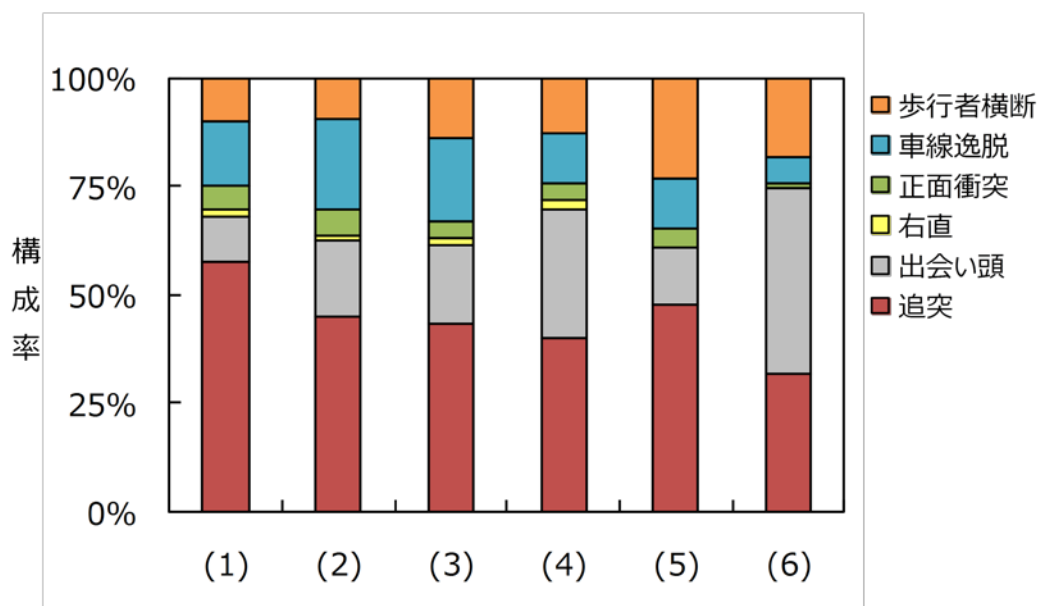


図 2.2.5-5 自動走行システム搭載時の事故構成比率

2.3 交通事故低減詳細効果シミュレーション周辺機能の開発

前述のシミュレーション本体の周辺機能である、GUI機能の開発（2.3.1節）と道路エディタの開発（2.3.2節）について述べる。

2.3.1 シミュレーション GUI 機能の開発

本項にて、交通環境再現型シミュレーションの設定、実行、結果の確認を行うためのグラフィカル・ユーザ・インタフェース（以下、「GUI」という）の機能について述べる。なお、GUIを使用せずにバッチモードでも使用可能とする。

(1) シミュレーション GUI 詳細説明

図 2.3.1-1 に平成 29 年度開発の GUI を示す。

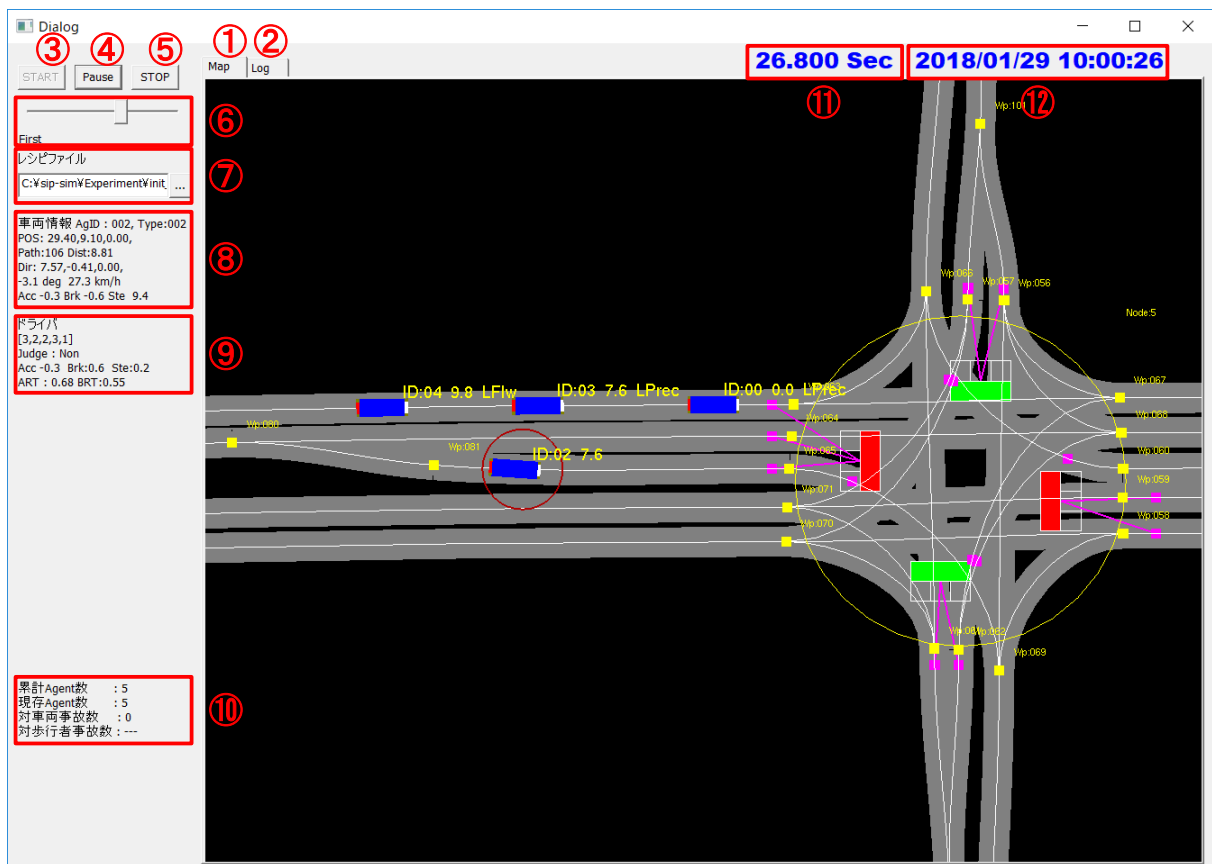


図 2.3.1-1 シミュレーション鳥瞰図表示画面

- ① シミュレーションの動画画面が表示される。
- ② シミュレーション単位時間ごとの実行ログが表示される。
- ③ シミュレーションを開始する。
- ④ シミュレーション一時停止・再開する。
- ⑤ シミュレーションを停止する。
- ⑥ シミュレーションの描画速度を調整する。
- ⑦ シミュレーションで使用するレシピファイルを指定する。「...」をクリックすると
図 2.3.1-2 のダイアログが開く
 - (i) レシピファイルをひとつ選択
 - (ii) 「開く」でレシピファイルを読み込む。
- ⑧ シミュレーション実行時に画面上で円で囲まれている表示対象の車両情報を随時更新・表示する。
- ⑨ シミュレーション実行時の表示対象のドライバ情報を随時更新・表示する。
- ⑩ シミュレーション実行時の累計 Agent 数、現存 Agent 数、対車両事故数を随時更新・表示する。
- ⑪ シミュレーション実行経過時間を表示する。
- ⑫ シミュレーション実行時刻を表示する。開始時刻はレシピファイルに記述する。

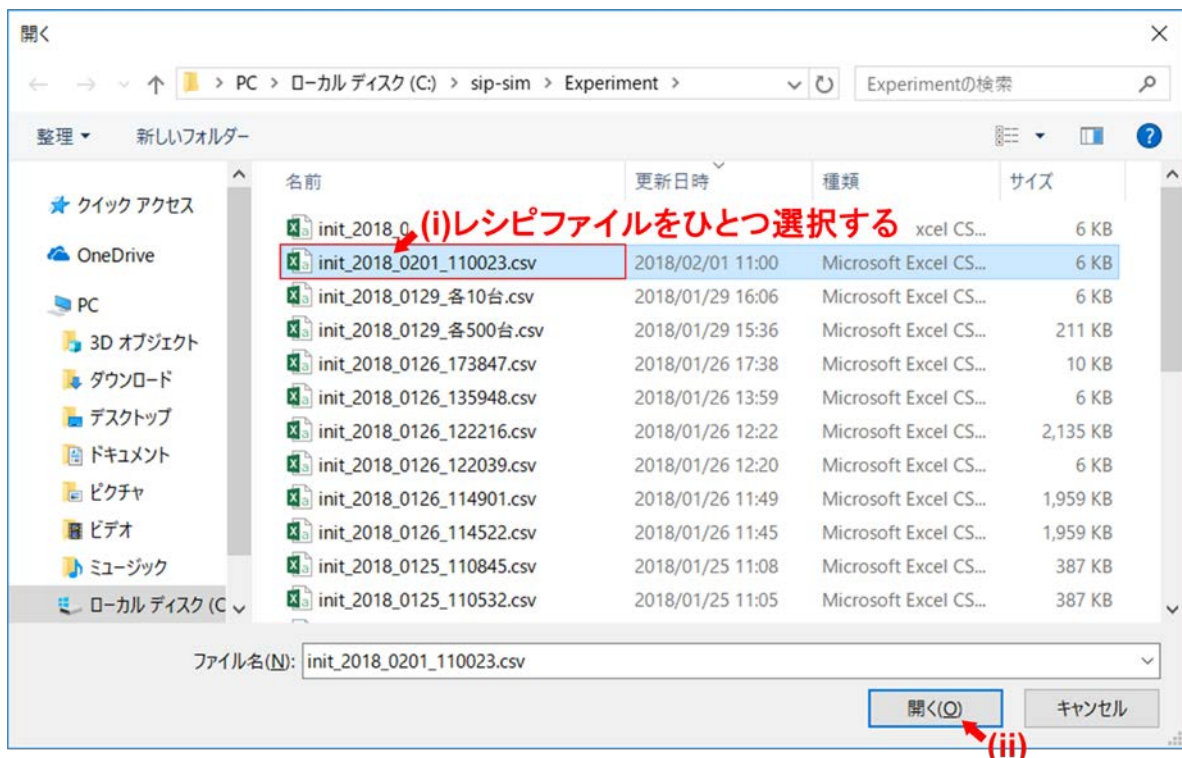


図 2.3.1-2 レシピファイルの選択ダイアログ

図 2.3.1-3 にシミュレーション実行時の表示情報を示す。

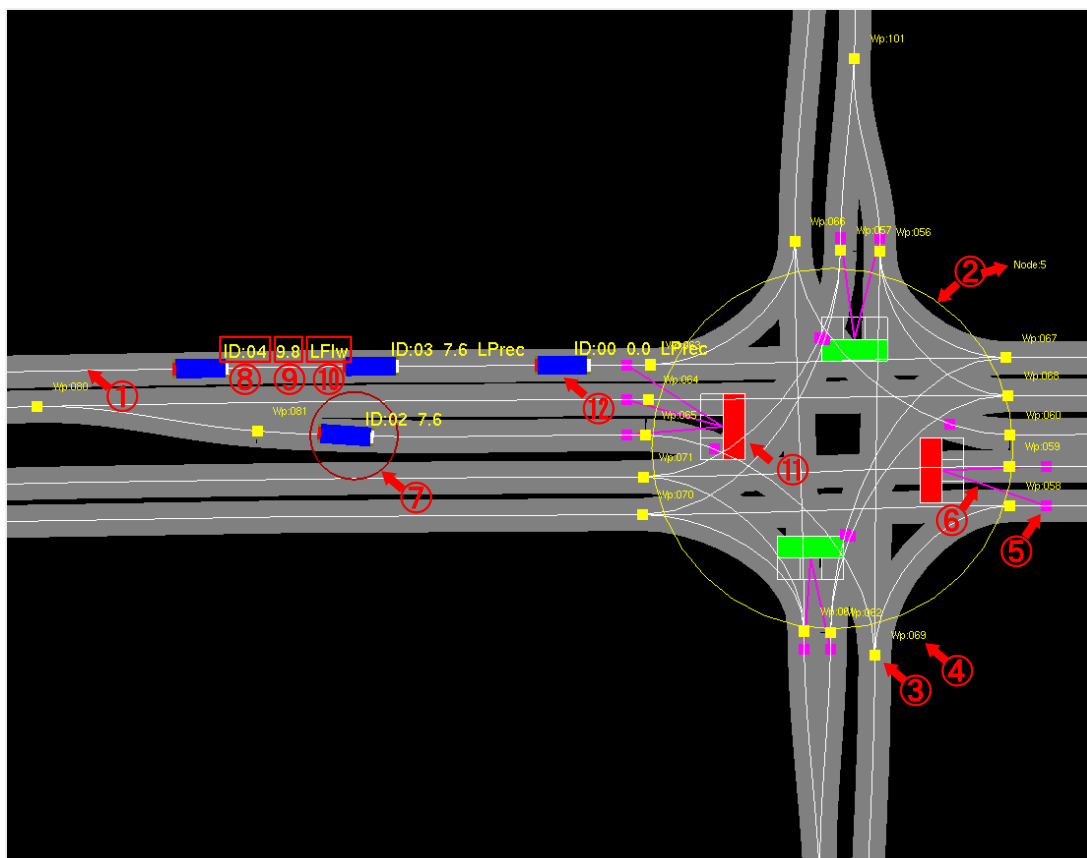


図 2.3.1-3 シミュレーション動画画面

- ① パス (PathLine)
- ② ノードとノード ID (NodeID)
- ③ ウェイポイント (Wp)
- ④ ウェイポイント ID (Wp ID)
- ⑤ 停止線
- ⑥ 停止線 信号機接続：停止線がどの信号機に対するものであるかを示す。
- ⑦ 表示対象となる車両を示す。
- ⑧ 車両 ID
- ⑨ 車両速度[m/s]
- ⑩ 識別子：表示対象からみた相対的な位置関係を示す。車両の識別子の分類を表 2.3.1-1 に示す。

表 2.3.1-1 車両の識別子

識別子	意味
Prece	先行車
Follw	後続車
LPrec	左側先行車
LFlw	左側後続車
RPrec	右側先行車
RFlw	右側後続車
Comm	対向車
CmRT	対向右折車
CmLT	対向左折車
RCrs	右側交差車
RCrRT	右側交差右折車
RCrLT	右側交差左折車
LCrs	左側交差車
LCrRT	左側交差右折車
LCrLT	左側交差左折車

⑪ 信号機

⑫ Agent（車両）：Agent 状態の意味付けを表 2.3.1-2 に示す。

表 2.3.1-2 Agent の意味付け

青色	手動走行車両
緑色	自動走行車両
赤色	事故状態
車両に△マーク	「知覚」エラー状態

(2) マウス操作説明

マウス操作による動作を表 2.3.1-3 に示す。

表 2.3.1-3 マウス操作説明

スクロールホイール	地図の拡大・縮小を行う。
左ボタンダブルクリック	車両の上で左ボタンダブルクリックをするとその車両を表示対象に指定する。
左ボタンドラッグ	表示位置の移動を行う。
右ボタンクリック	ポップアップメニュー（図 2.3.1-4）を表示する。

(3) ポップアップメニュー説明

ポップアップメニューの説明を図 2.3.1-4 に示す。

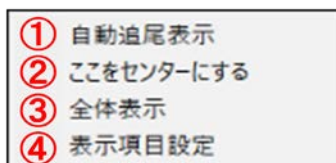


図 2.3.1-4 ポップアップメニュー

- ① 指定した車両を常に画面の中心の状態にする。
- ② 右ボタンクリックした地点を画面の中心の状態にする。①を解除した場合に有効。
- ③ 地図全体を表示する。
- ④ 表示項目設定ダイアログ（図 2.3.1-5）を表示する。

(4) 表示項目設定ダイアログ説明

表示項目設定ダイアログの説明を図 2.3.1-5 に示す。

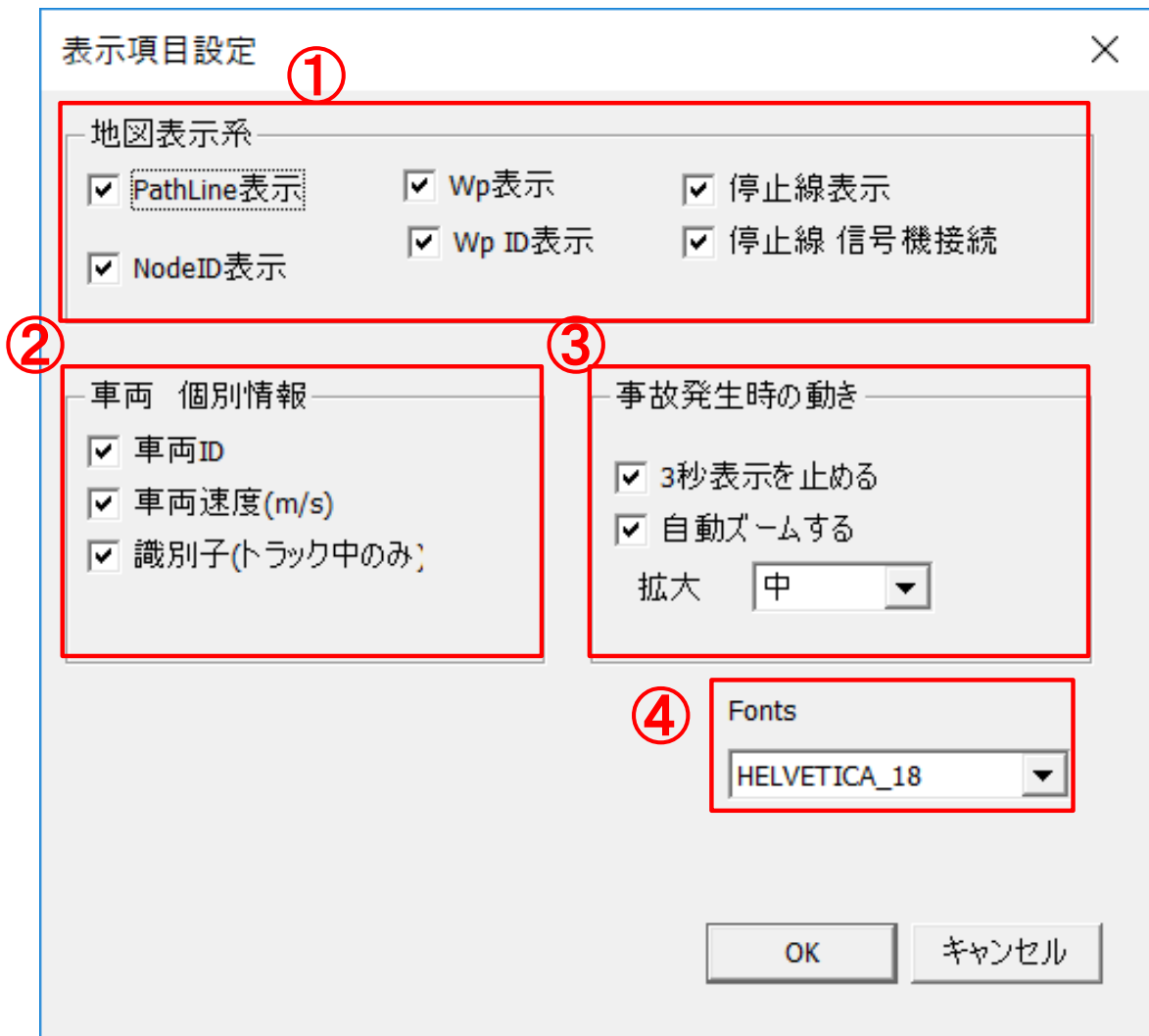


図 2.3.1-5 表示項目設定ダイアログ

- ① 地図関連の項目表示有無をチェックボックスで指定する。
- ② 車両関連の項目表示有無をチェックボックスで指定する。
- ③ 事故発生時の挙動を設定する。
- ④ 動画画面内の車両個別情報のフォント・フォントサイズを指定する。
フォントサイズは画面の拡大・縮小に依存しない。

(5) ログ表示画面説明

ログ表示画面を図 2.3.1-6 に示す。

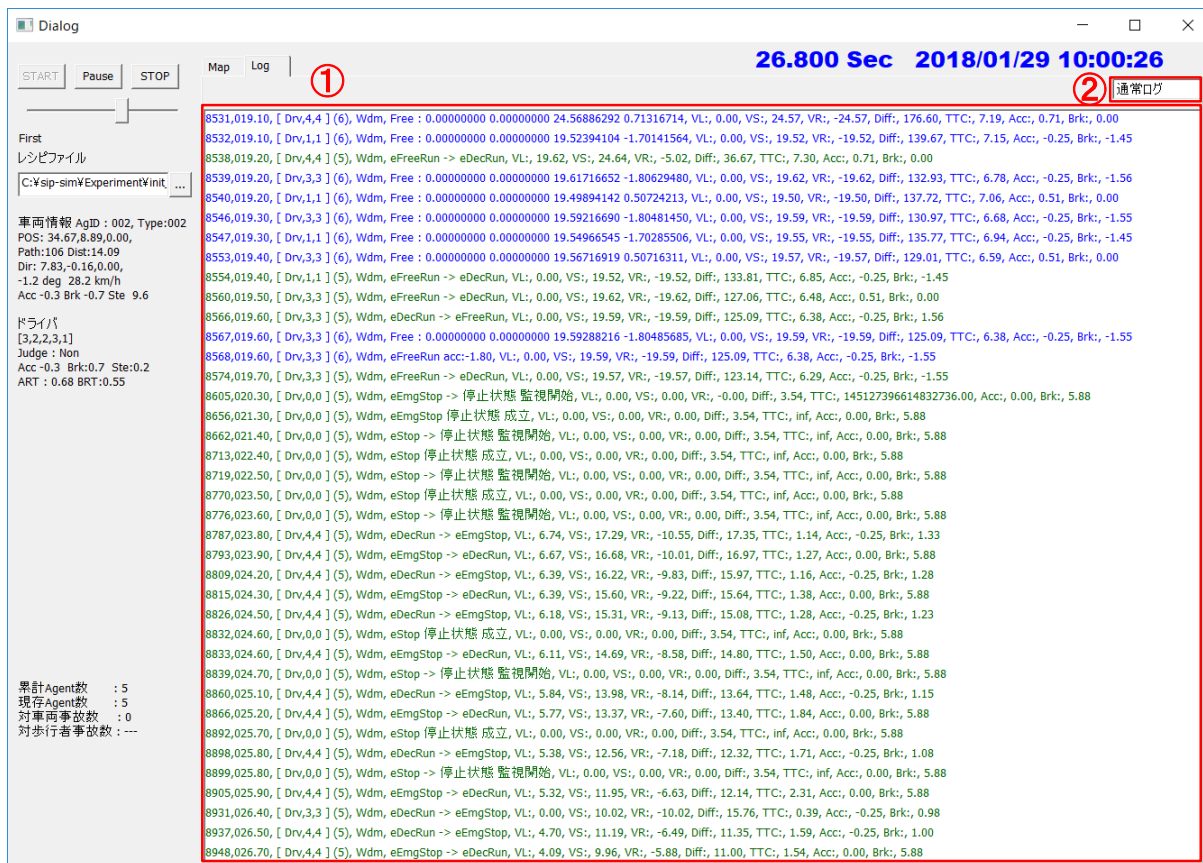


図 2.3.1-6 シミュレーションログ表示画面

① ログ出力ウィンドウ

② ログ出力モードを選択する。

- ・通常ログ（デフォルト）ユーザモードで使用

車両単位に、シミュレーション単位時間ごとに2行ずつ出力される。

その他には信号機の変化、新しく Agent が発生したときの Agent 情報等が出力される。詳細は、2.2.5 節を参照。

- ・最小ログ/デバッグログ（詳細ログ）プログラム開発モードで使用

2.3.2 道路エディタの開発

シミュレーションに入力する道路構造を作成するための道路エディタの機能とその使用方法を示す。また、平成 28 年度「SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）・自動走行システム」における自動走行システム向け地図データ開発²⁻⁶⁾の成果物である電子地図情

報を入力データとして使用するための検討結果を述べる。

(1) 道路エディタの概要

道路構造エディタは、道路管理モジュールの入力となる道路構造を生成するためのツールである。

(2) 道路エディタの処理概要と道路構造

道路エディタで設定すべきデータは、背景データ、道路データ、信号現示データ、ODデータとなる。図 2.3.2-1 に道路エディタの処理概要を示す。

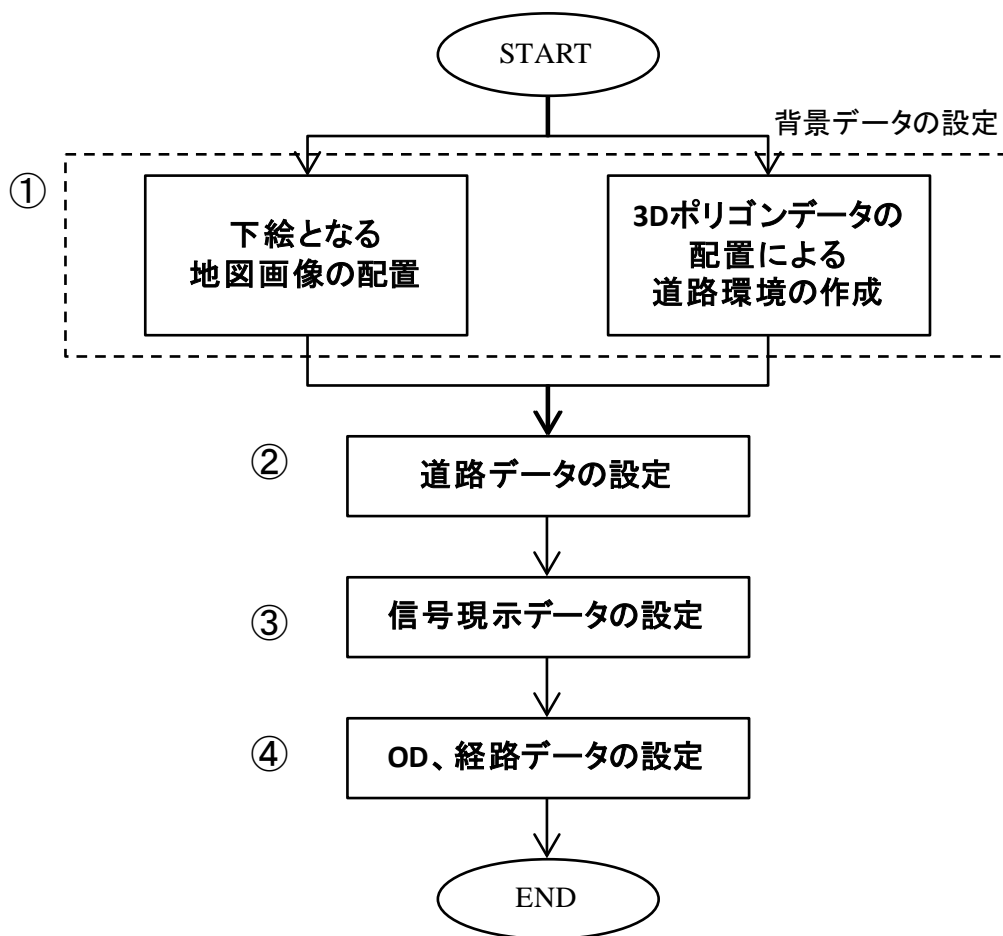


図 2.3.2-1 道路エディタ処理概要

平成 29 年度事業の道路情報は、交通環境再現を行う中で平成 28 年度までに開発した追従・追突、歩行者横断、車両逸脱の 3 の事件事例を再現できる道路構造とする。

図 2.3.2-2 に道路構造のイメージを示す。(内閣府 平成 28 年度 SIP における自動走行システム向け地図データより)

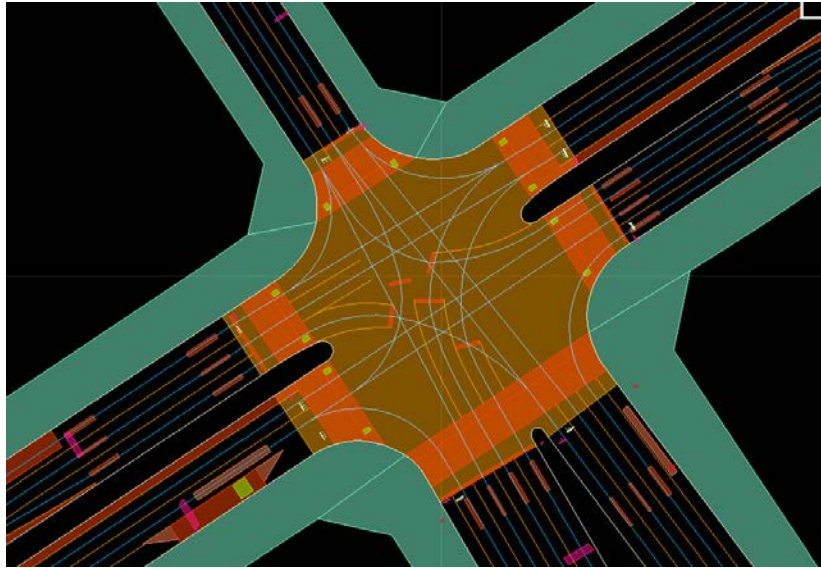


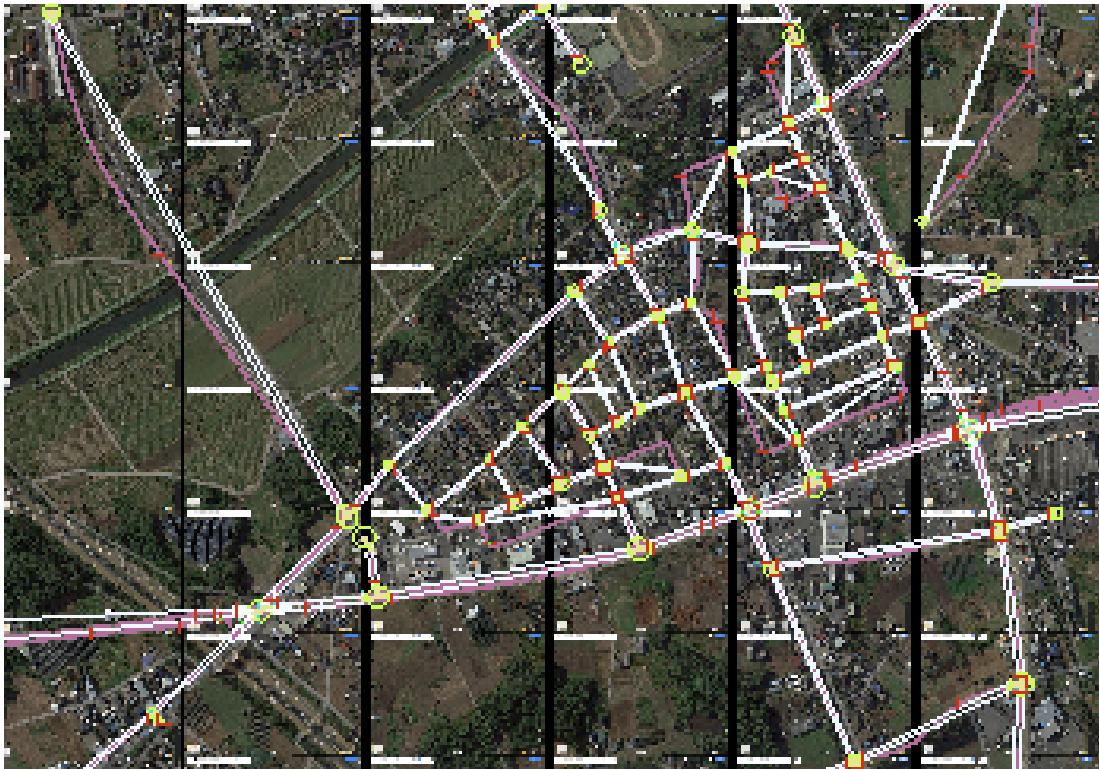
図 2.3.2-2 道路構造イメージ

平成 29 年度事業で使用する道路構造を以下に示す。

- 地図の構成要素
車道、歩道、路側帯、中央分離帯等の道路構造物
- 車道毎のパス情報
車両が走る走行パス（走行レーン）、制限速度、平均速度。走行レーン周辺の歩道、側溝、路側帯、白線、走行面、黄色線、その他として中央分離帯を定義する。
- 路外構造物
路外構造物としては、障壁、電柱、家屋、ガードレール、道路外緩衝帯、その他の障害物と道路地図外を定義する。

次頁より図 2.3.2-3 に下絵地図情報の配置、図 2.3.2-4 に道路構造データの設定例を示す。

① 下絵となる地図情報の配置



地図データ @2018 Google,ZENRIN

図 2.3.2-3 下絵地図情報の配置イメージ

② 道路構造データの設定



図 2.3.2-4 道路構造データの設定

下絵地図情報から、シミュレーションで使用する道路のみを選択し、データ化する。

③ 信号現示データの設定

信号現示データの設定は、Signal Pattern Editorで行う。道路エディタの Tool メニューから"Show Signal Pattern Editor"を選択し、Signal Pattern Editor のウィンドウを表示する。道路環境データを読み込み、信号交差点に対応するノード毎に、信号現示を設定する。図 2.3.2-5 に信号現示パターンを設定した画面を示す。図 2.3.2-6 に 7:00 から 11:00 までの 4 時間分のデータ設定例を示す (2 時間=7200 秒)。

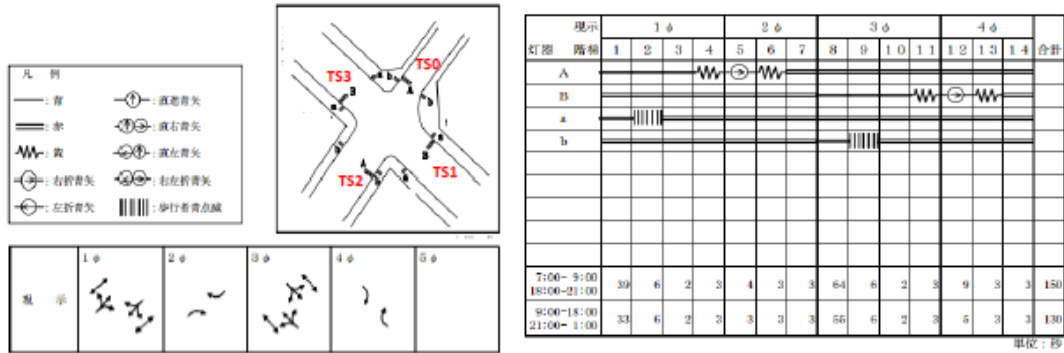


図 2.3.2-5 信号現示パターン

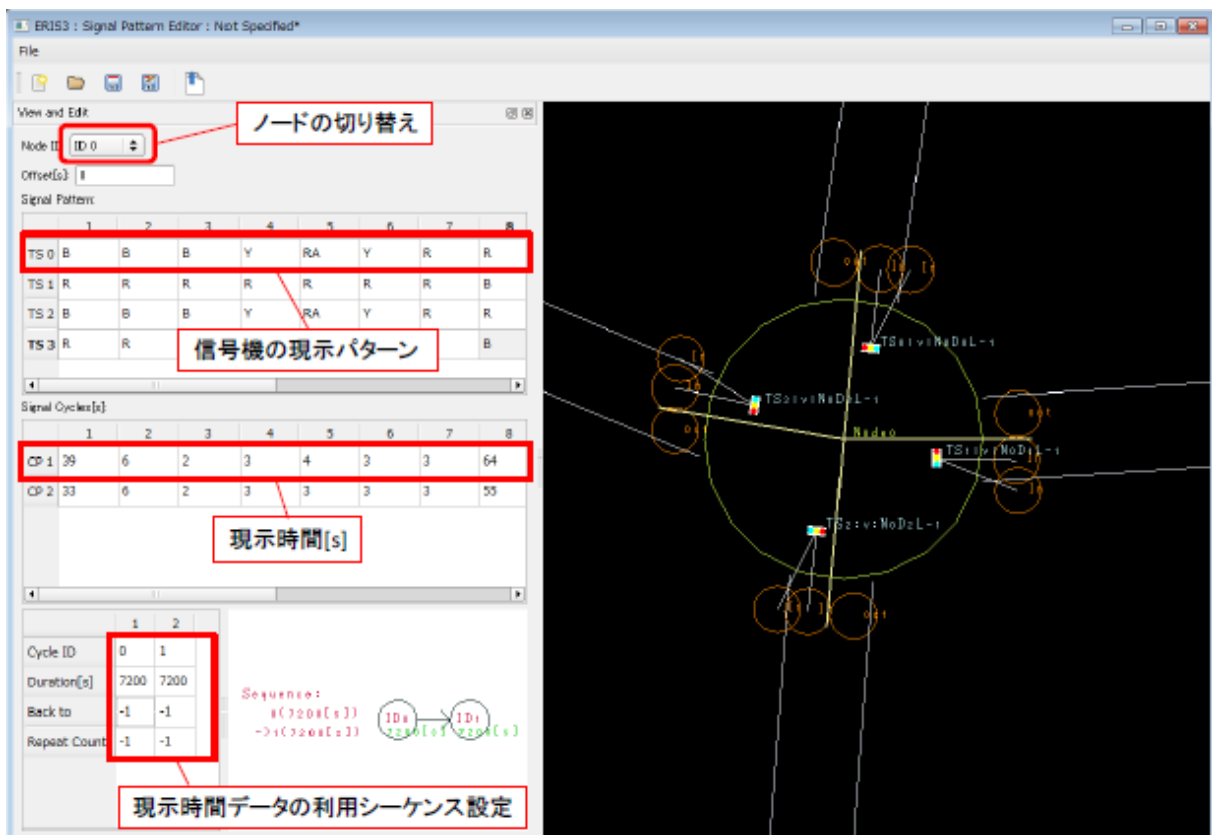


図 2.3.2-6 Signal Pattern Editor 設定例

④ OD、経路データの設定

OD 選択率や端末ノードからの交通需要等の交通データの設定は、OD Data Editor にて行う。Tool メニューから"Show OD Data Editor"を選択し、図 2.3.2-7 の OD Data Editor のウィンドウにて各ノードの属性を設定する。

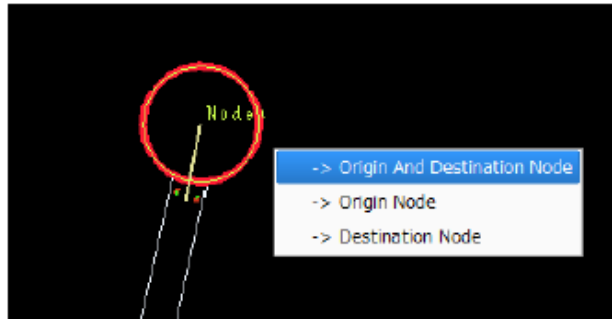


図 2.3.2-7 各ノード毎の設定

次に、OD 選択率を設定する。"Show OD Data"ボタンを押して、OD 選択率表ダイアログを表示して数値を設定する。台数を設定して"Normalize Data"ボタンを押すと、選択率に変換することも可能。(図 2.3.2-8 参照)

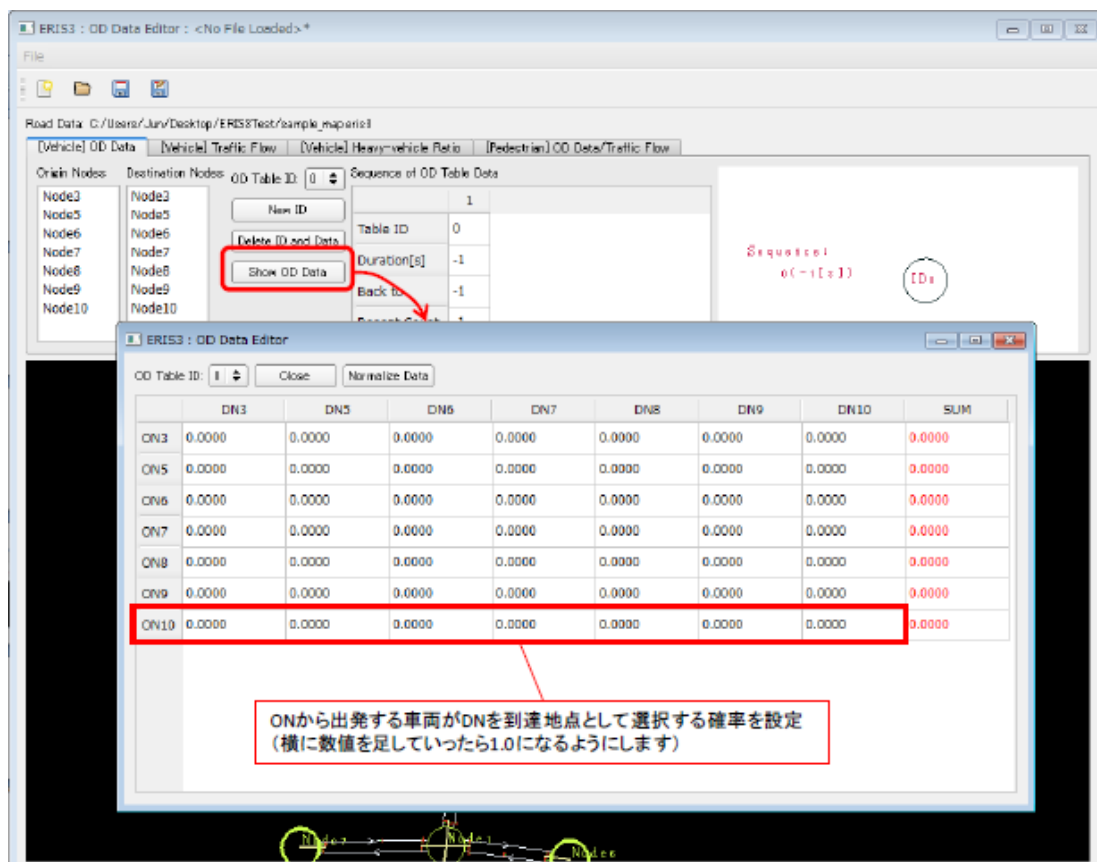


図 2.3.2-8 各 OD の選択率設定

なお、OD 選択表は複数作成することができ、それを切り替えて使うように設定することも可能。たとえば、1 時間ごとの OD 選択表を 4 つ作成して、1 時間ごとに切り替えて使用するためには図 2.3.2-9 のように利用シーケンスを設定する。

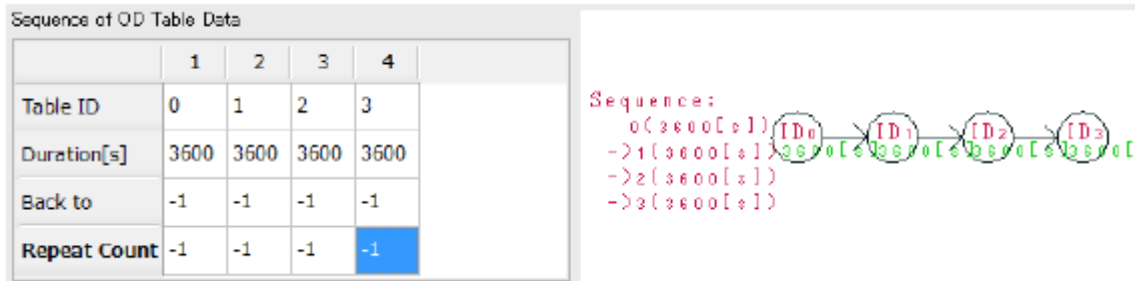


図 2.3.2-9 OD 選択表の利用シーケンスの設定

(3) 電子地図データの変換

本事業の道路構造データ作成に、国内で使用されている電子地図データの活用ができないか検討した。

多くの電子地図データは各社固有の著作権が設定されており、二次作成の地図情報に関してもそれを使用する場合は年度毎に年間使用料を支払い、使用件数毎にロイヤリティを支払うこととなっている。

このため平成 28 年度科学技術イノベーション創造推進委託「SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）・自動走行システム」自動走行システムの実現に向けた諸課題とその解決の方向性に関する調査・検討におけるダイナミックマップ構築に向けた試作・評価に係る調査検討²⁻⁷⁾の成果である、

- ・ダイナミックマップの情報（実際のデータベース、地図情報サンプル）
- ・ダイナミックマップのデータフォーマット
- ・ダイナミックマップをアクセスするための Viewer

に関して、委託契約書第 41 条第 3 項の規定に基づき申請し、成果利用承認通知書にて内閣府に承認を得、入手した情報が平成 29 年度事業にて活用できないかの検討を実施した。

なお、著作権フリーの電子地図情報も有るが、地図情報としての分解能が車道レベルの定義であり車線情報を個別に得ることができないため検討対象から除外した。

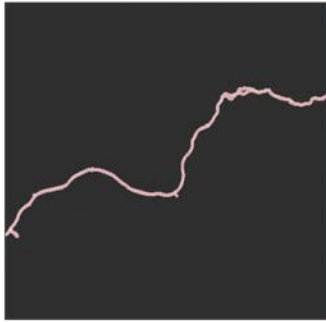
① 平成 28 年度版ダイナミックマップ情報調査

内閣府より平成 28 年度のダイナミックマップの成果を入手し、平成 27 年度のダイナミックマップデータとの比較を実施

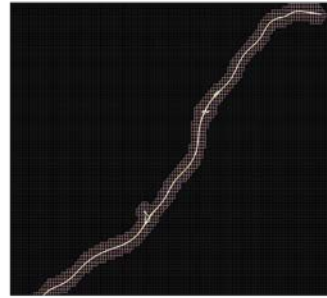
- ・追加項目

地図情報が、お台場地区以外に 3 つの高速道路情報が追加（図 2.3.2-10 参照）

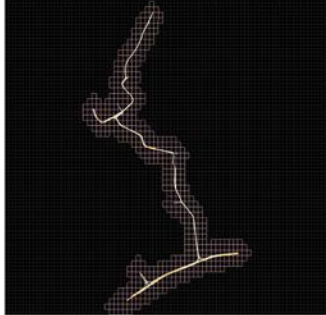
秦野中井IC～東名自動車道(左コース)～御殿場JCT～
新東名自動車道～清水いはらIC



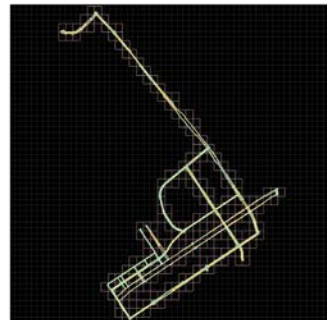
東京IC～東名自動車道～横浜町田IC



有明IC～首都高湾岸線～辰巳JCT～首都高9号深川線～
箱崎JCT～首都高6号向島線～駒形IC



新橋駅～東銀座駅～新豊洲駅～お台場エリア



内閣府 平成 28 年度 SIP における自動走行システム向け地図データより
図 2.3.2-10 平成 28 年度ダイナミックマップ公開データ

・変更項目

- (i) フォーマットが csv,shap から xml に変更
- (ii) 歩道情報が追加（領域情報としての定義）
- (iii) 道路標識情報として、交差点内停止線や車線上の進行方向指示が追加
横断歩道や通常の停止線は属性が変更され道路標識情報に統合
- (iv) 交差点内のノード情報の簡略化

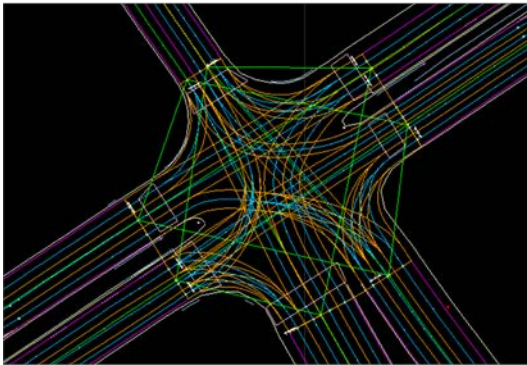
② ダイナミックマップ変換方式の検討

- (i) ダイナミックマップで定義されているロケーション情報を xml から取り出し道路情報として使用する。（xml 中には、緯度経度標高の表示も格納されているが、xyz 座用系の情報も格納されているため xyz 系の数値を採用する。）
- (ii) パス情報は、車線リンクの情報をもとに生成する。また、道路上の白線は、区画線情報で代用する。
- (iii) ノード情報は、交差点内車線リンク情報をもとに生成する。
- (iv) 道路障害物（構造物）は区画線、路肩縁、歩道領域をもとに生成する。
- (v) その他構造物（信号、横断歩道、標識等）は、ダイナミックマップに定義されている情報を変換し使用する（道路標識）。

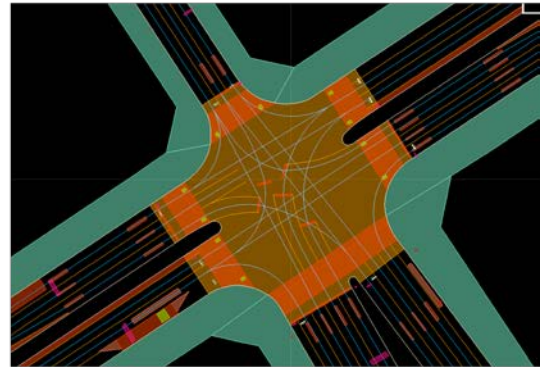
図 2.3.2-11 に平成 27 年度、平成 28 年度のダイナミックマップのイメージ比較を示す。



台場交差点 航空写真



平成27年度 台場交差点



平成28年度 台場交差点

地図データ @2018 Google, ZENRIN

内閣府 平成 27、28 年度 SIP における自動走行システム向け地図データ
図 2.3.2-11 ダイナミックマップ イメージ比較

③ ダイナミックマップ変換試行

(i) ダイナミックマップの要素と交通環境再現型シミュレーションにおける道路要素との対応

ダイナミックマップでは、以下(図 2.3.2-12)に示すように、多様な要素²⁻⁸⁾が与えられている。

```
<xsd:complexType name="FeatureDataRecord">
  <!-- 実在地物 -->
  <xsd:choice>
    <xsd:element name="bridge-elevatedRoad" type="Bridge-ElevatedRoad_Fea"/>
    <xsd:element name="railCrossing" type="RailCrossing_Fea"/>
    <xsd:element name="underpassWall" type="UnderpassWall_Fea"/>
    <xsd:element name="subgradeWall" type="SubgradeWall_Fea"/>
    <xsd:element name="tunnelWall" type="TunnelWall_Fea"/>
    <xsd:element name="caveEntrance-Gate" type="CaveEntrance-Gate_Fea"/>
    <xsd:element name="shelterWall" type="ShelterWall_Fea"/>
  </xsd:choice>
</xsd:complexType>
```

```
<xsd:element name="roadShoulder" type="RoadShoulder_Fea"/>
<xsd:element name="curb" type="Curb_Fea"/>
<xsd:element name="tramStation" type="TramStation_Fea"/>
<xsd:element name="tramLaying" type="TramLaying_Fea"/>
<xsd:element name="sideDitch" type="SideDitch_Fea"/>
<xsd:element name="gurdrail" type="Gurdrail_Fea"/>
<xsd:element name="fence" type="Fence_Fea"/>
<xsd:element name="barrier" type="Barrier_Fea"/>
<xsd:element name="centralDivider" type="CentralDivider_Fea"/>
<xsd:element name="plantingZone" type="PlantingZone_Fea"/>
<xsd:element name="trafficIsland" type="TrafficIsland_Fea"/>
<xsd:element name="pile-Pole" type="PilePole_Fea"/>
<xsd:element name="physicalGore" type="PhysicalGore_Fea"/>
<xsd:element name="pillar" type="Pillar_Fea"/>
<xsd:element name="oherObstructingRoadFurniture"
type="OtherObstructingRoadFurniture_Fea"/>
<xsd:element name="trafficSignal" type="TrafficSignal_Fea"/>
<xsd:element name="emergencyParkingZone" type="EmergencyParkingZone_Fea"/>
<xsd:element name="busStopZone" type="BusStopZone_Fea"/>
<xsd:element name="subgradeJoint" type="SubgradeJoint_Fea"/>
<xsd:element name="pedestrianBridge" type="PedestrianBridge_Fea"/>
<xsd:element name="gantry" type="Gantry_Fea"/>
<xsd:element name="speedBreaker" type="SpeedBreaker_Fea"/>
<xsd:element name="postbox" type="Postbox_Fea"/>
<xsd:element name="roadInformationBoard" type="RoadInformationBoard_Fea"/>
<xsd:element name="mileStone" type="MileStone_Fea"/>
<xsd:element name="levelPoint" type="LevelPoint_Fea"/>
<xsd:element name="roadLight" type="RoadLight_Fea"/>
<xsd:element name="utilityPole" type="UtilityPole_Fea"/>
<xsd:element name="deliniator" type="Deliniator_Fea"/>
<xsd:element name="catEye" type="CatEye_Fea"/>
<xsd:element name="busStop" type="BusStop_Fea"/>
<xsd:element name="overheadRoadFurniture" type="OverheadRoadFurniture_Fea"/>
<xsd:element name="otherPOI" type="OtherPOI_Fea"/>
<xsd:element name="pedestrianCrossing" type="PedestrianCrossing_Fea"/>
<xsd:element name="stopLine" type="StopLine_Fea"/>
<xsd:element name="centerLine" type="CenterLine_Fea"/>
<xsd:element name="laneLine" type="LaneLine_Fea"/>
<xsd:element name="laneEdge" type="LaneEdge_Fea"/>
```

```

<xsd:element name="crossWalkLine" type="CrossWalkLine_Fea"/>
<xsd:element name="obstructionApproachMarking" type="ObstructionApproachMarking_Fea"/>
<xsd:element name="channelisingIsland" type="ChannelisingIsland_Fea"/>
<xsd:element name="parkingOnPavement" type="ParkingOnPavement_Fea"/>
<xsd:element name="parkingZone" type="ParkingZone_Fea"/>
<xsd:element name="parkingComartmentLine" type="ParkingCompartmentLine_Fea"/>
<xsd:element name="parkingSlot" type="ParkingSlot_Fea"/>
<xsd:element name="otherParkingMarker" type="OtherParkingMarker_Fea"/>
<xsd:element name="otherRoadMarking" type="OtherRoadMarking_Fea"/>
<xsd:element name="signage" type="Signage_Fea"/>
<!-- 仮想地物 -->
<xsd:element name="auxiliaryLine" type="AuxiliaryLine_Fea"/>
<xsd:element name="auxiliaryFeatureForComplex" type="AuxiliaryFeatureForComplex_Fea"/>
<!-- 複合地物 -->
<xsd:element name="complexFeature" type="ComplexFeature_Fea"/>
<!-- 仮想地物（道路） -->
<xsd:element name="carriagewayLink" type="CarriagewayLink_Fea"/>
<xsd:element name="laneLink" type="LaneLink_Fea"/>
<xsd:element name="intersectionLaneLink" type="IntersectionLaneLink_Fea"/>
<xsd:element name="carriagewayNode" type="CarriagewayNode_Fea"/>
<xsd:element name="laneNode" type="LaneNode_Fea"/>
<xsd:element name="auxiliaryNode" type="AuxiliaryNode_Fea"/>
<xsd:element name="carriagewayBelt" type="CarriagewayBelt_Fea"/>
<xsd:element name="beltFormedIntersection" type="Belt-FormedIntersection_Fea"/>
<xsd:element name="areaFormedIntersection" type="Area-FormedIntersection_Fea"/>
<xsd:element name="lineFormedIntersection" type="Line-FormedIntersection_Fea"/>
<xsd:element name="intersectionComplexFeature" type="IntersectionComplexFeature_Fea"/>
<xsd:element name="laneBelt" type="LaneBelt_Fea"/>
<xsd:element name="laneJoint" type="LaneJoint_Fea"/>
<xsd:element name="carriagewayPEA" type="CarriagewayPEA_Fea"/>
<xsd:element name="intersectionPEA" type="IntersectionPEA_Fea"/>
<xsd:element name="cRPNode" type="CommonReferencePoint_Fea"/>
</xsd:choice>
</xsd:complexType>

```

図 2.3.2-12 ダイナミックマップ仕様書：定義されている要素

この中から、交通環境再現型シミュレーションを行うために必要な道路データを作成するのに使用できる要素²⁻⁸⁾として、以下（表 2.3.2-1）を選択した。

表 2.3.2-1. ダイナミックマップの要素と
交通環境再現型シミュレーションにおける道路要素との対応付け

ダイナミックマップ中の要素	シミュレーションにおける道路要素
laneLink	ウェイポイント、パス
intersectionLaneLink	ウェイポイント、パス
areaFormedIntersection	ノード
trafficSignal	信号機
pedestrianCrossing	歩行者用パス（横断歩道）

上表の各ダイナミックマップの要素から、交通環境再現型シミュレーションにおける道路要素への変換処理の詳細について、以下に示す。

(ii) 道路データ変換処理フロー

ダイナミックマップのデータから、交通環境再現型シミュレーションにおける道路データ生成の素となるスクリプトファイルを生成する処理フローを図 2.3.2-13 に示す。

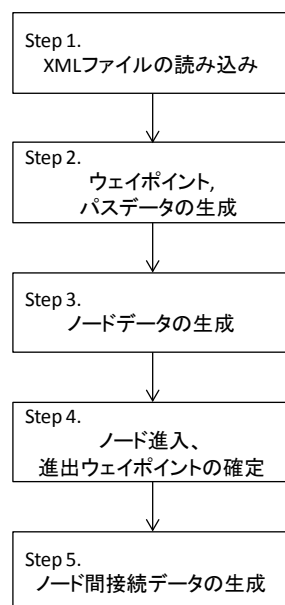


図 2.3.2-13 処理フロー

各ステップについて、以下に説明する。

Step 1. ダイナミックマップの XML ファイル読み込み

ダイナミックマップの XML ファイルを読み込む。XML ファイルは、ツリー構造となっており、以下の構造部分を取り出す。

```

<featureDataSet>
  <featureDataRecord>
    <*****>
      <geometry>
        <geometryDescription>
          <geometryDescription_polyline>
            <vertex>
              <Coordinates_XY>9:X:Y:H:Z</Coordinates_XY>

```

図 2.3.2-14 XML ファイルから抽出するツリー構造部

図 2.3.2-14 の<*****>には、表 2.3.2-1 の laneLink, intersectionLaneLink, areaFormedIntersection, trafficSignal, pedestrianCrossing が入る。また、Coordinates_XY タグにおける X, Y, H, Z は、X 軸座標（北方向正）、Y 軸座標（東方向正）、楕円体高、標高である。当該データは、表 2.3.2-2 に定義する構造体データに格納する。

表 2.3.2-2 vertex 構造体データ

番号	型	変数名	備考
1	string	objectType	文字列データ
2	int	numVertex	<numberOfVertex>の数値を格納
3	vector<Point3D>	points	可変長配列（動的配列） Point3D は x,y,z の float 型 3 変数を要素に持つ構造体

Step 2. ウェイポイント・パスデータの生成

最初に、Step1 で読み込んだ laneLink と intersectionLaneLink の点列データから、ウェイポイントデータとパスデータを生成する。点列データは細かい間隔で与えられており、図 2.3.2-15 に示すように、連続する 2 点からウェイポイントデータの位置と方位角を設定し、2 つのウェイポイントからパスデータを仮作成して、その間の点列がパス上から 0.2m 以上離れていなければその点列はパスで表現できるとして、2 つのウェイポイントデータと 1 つのパスデータを確定する。

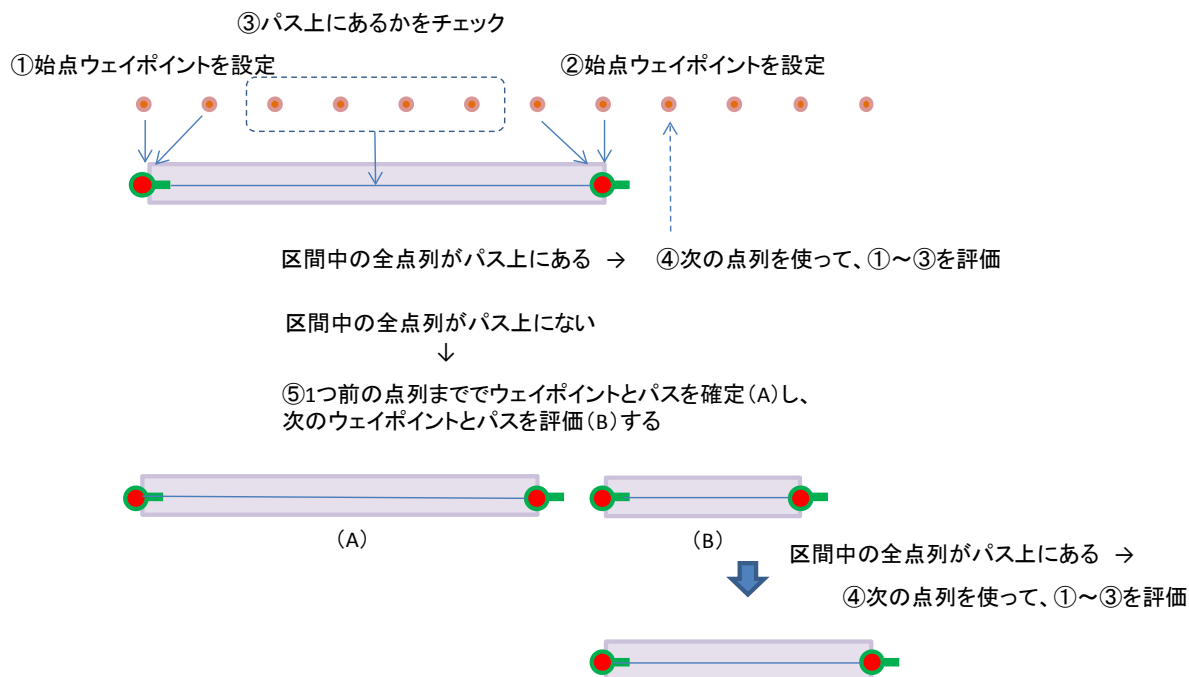


図 2.3.2-15 点列データからのウェイポイントとパスデータの生成

Step 3. ノードデータの生成

ノードデータは、areaFormedIntersection データから生成する。areaFormedIntersection データは、以下の図のように、交差点の輪郭を与えるデータである。図 2.3.2-16 に areaFormedIntersection データのイメージを示す。

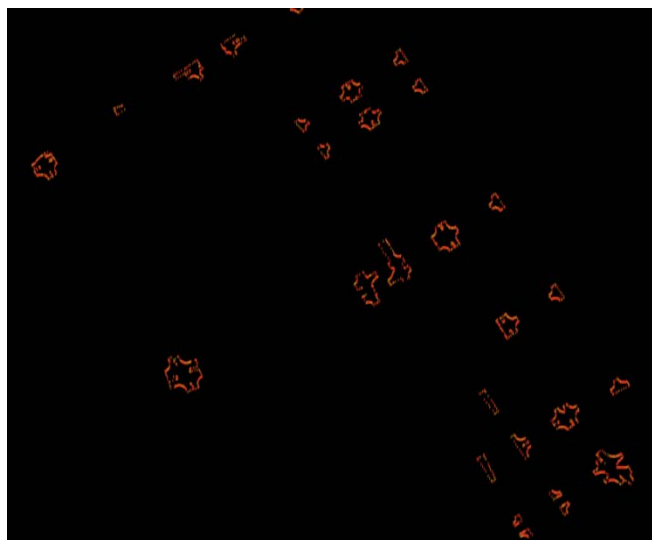


図 2.3.2-16 areaFormedIntersection データ

ノードデータを生成するためには、中心座標、交差する単路数、単路の交差方位角の情報が必要となる。それぞれ、以下のようにして決定する。

Step 3-1 中心座標

areaFormedIntersection データの点列データの中心座標を算出して、それをノード中心座標とする。また、その座標を中心として、areaFormedIntersection データの全点列を内包する外接円の半径を求める。

Step 3-2 交差する単路数と方位角

外接円の内部に存在するウェイポイントについて、外接円の外部のウェイポイントと繋がっているウェイポイントをリストアップして、その方位角データから、交差する単路数と方位角を決定する。

たとえば、図 2.3.2-17 のようなデータの場合、オレンジ色の丸で囲ったウェイポイントが外接円の外部のウェイポイントと繋がっているウェイポイントであり、その方位角データから、交差点する単路数は 2、方位角は 0°]度と 180°]というように決定する。

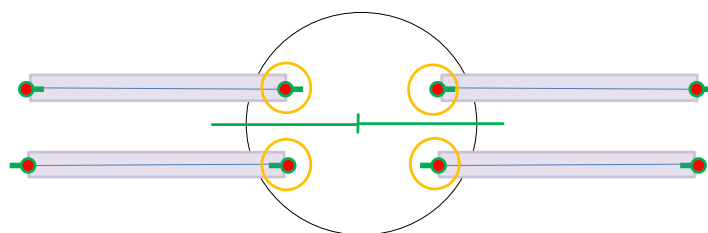


図 2.3.2-17 接続単路数と方位角の決定

Step 3-3 信号機の設定

trafficSignal データの点列データが Step 3-1 で算出した外接円内に存在するかどうかを確認して、存在していれば信号交差点であるとして、各方向に信号機を設定する。

Step 4. ノード進入／進出ウェイポイントの確定

Step 3-2 の手順で抽出したウェイポイントを、ノード進入ウェイポイントもしくはノード進出ウェイポイントとして、ノードデータに登録する。ノード進入／進出の方向は、Step 3-2 にて決定されたノードへの単路の接続方位角から決定する。

Step 5. ノード間接続データの生成

ノード進出ウェイポイントからパスを前方に辿って行って、他のノードのノード進入ウェイポイントに辿り着くことができれば、図 2.3.2-18 に示すようにノード間に接続関係があるとして、接続情報を設定する。

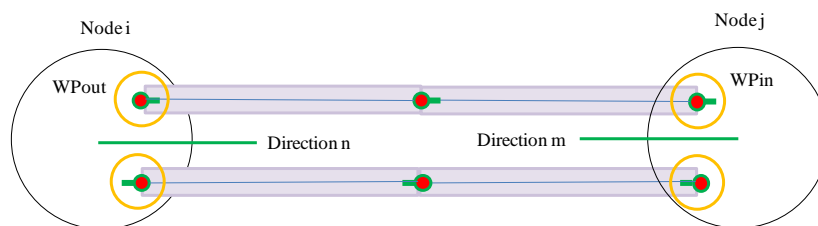


図 2.3.2-18 ノード間の接続関係

接続情報は、表 2.3.2-3 に定義する構造体データに格納する。

表 2.3.2-3 NodeConnectData 構造体データ

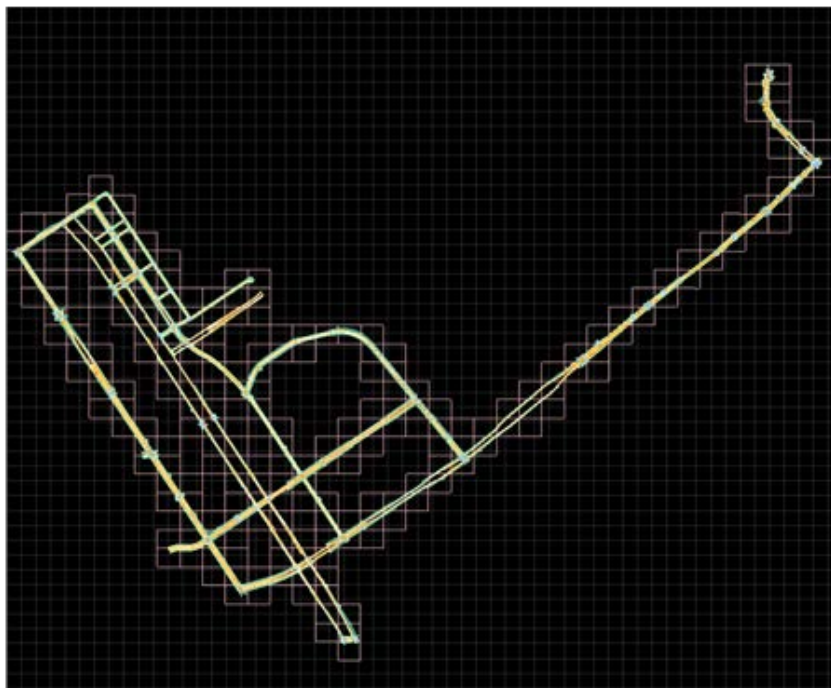
番号	型	変数名	備考
1	int	node_id	接続元のノードの ID
2	int	out_direct	接続元のノードから出発するときの方向 ID
3	int	connected_node	接続先のノードの ID
4	int	connected_node_in_direct	接続先のノードに進入するときの方向 ID

(iii) 実行結果

内閣府より入手したダイナミックマップの変換結果を図 2.3.2-19～図 2.3.2-23 に示す。

1) 一般道路（お台場）

ダイナミックマップ:



内閣府 平成 28 年度 SIP における自動走行システム向け地図データより
 図 2.3.2-19 ダイナミックマップ Viewer スクリーンショット（お台場）

変換された道路データ:

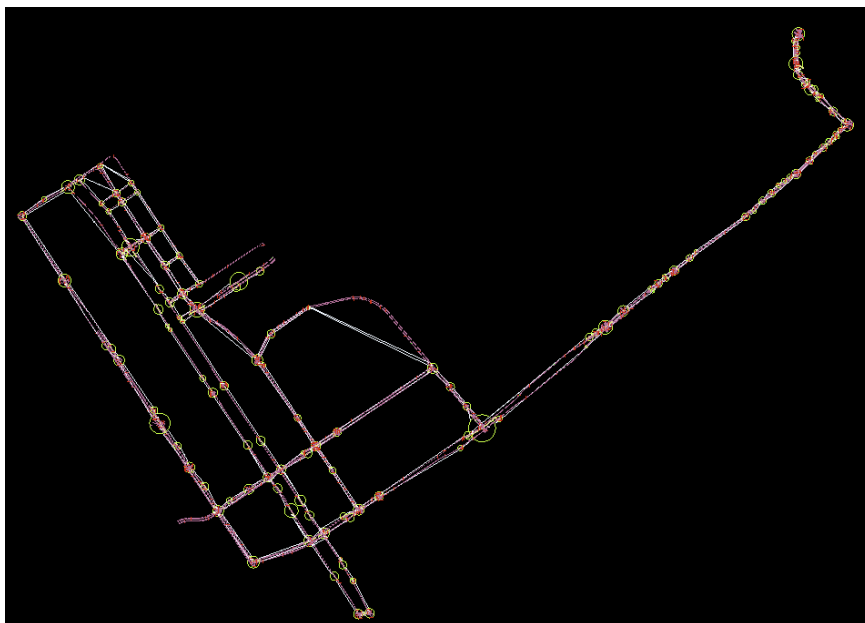


図 2.3.2-20 変換された道路データの全体図（お台場）



図 2.3.2-21 変換された道路データ拡大図（お台場）

2) 高速道路(有明 IC～首都高湾岸線～辰巳 JCT～首都高 9 号深川線～箱崎 JCT～首都高 6 号向島線～駒形 IC)

ダイナミックマップ:



内閣府 平成 28 年度 SIP における自動走行システム向け地図データより
図 2.3.2-22 ダイナミックマップ Viewer スクリーンショット (高速道路)

変換された道路データ:



図 2.3.2-23 変換された道路データ俯瞰図 No.1 (高速道路)

④ ダイナミックマップ変換に関する考察

平成 28 年度のダイナミックマップデータを使用し、交通環境再現型シミュレーション用の道路構造データを作成する方式について検討した。平成 28 年度のダイナミックマップデータを使用し、平成 29 年度開発のシミュレーションで使用する道路情報へは、パス、ノードなどの物理的情報の変換が行えることを確認した。これによりダイナミックマップのデータをもとにパスやノードなど、主要な要素については、変換用スクリプトを用いて作成できる見込みを得た。ただし、物理情報としては、以下に示す 2 点についてさらに情報を追加する必要がある。

(i) 図 2.3.2-11 の交差点情報をからもわかるように、ウェイポイント間接続情報が簡略化されている、ウェイポイントは車両が移動できる経路を定義しているため、交差点内での経路情報が不足している。

(ii) 交差点、停止線などのプロパティが平成 28 年度の情報では道路標識として統一されているため道路標識情報を変換した後に、道路形状から意味付けを判断し、情報を設定する必要がある。

さらに、交通環境再現型シミュレーションを行うためには、OD や交通量などの設定も必要である。これらのデータは、ダイナミックマップに含まれないため、交通センサスなどから情報を入手して追加する必要がある。

2.4 交通事故低減詳細効果シミュレーションにおける事故再現技術の開発

交通環境再現型シミュレーション上で偶発的に事故が発生するための事故再現技術を 2.4.1 項、また、平成 29 年度追加した事故場面の再現技術について 2.4.2 項（正面衝突事故）、2.4.3 項（出会い頭事故）にて述べる。

2.4.1 交通環境再現型シミュレーション実行中に事故再現させるための技術開発

交通環境を再現する中で、偶発的に事故が発生させるため、個々のドライバの属性毎に設定する脇見などの事故発生要因（確率分布）について述べる。

まず、事故場面特化型と交通環境再現型での事故再現方法の大きな違いについて述べる。事故場面特化型では、特定の場面（事故発生地点）で交通参加者が脇見、居眠り、飛び出しなど（事故発生要因）を行うことにより忠実に事故を再現させることができるが、交通環境再現型は通常交通流を再現させているため、特定の地点で事故が発生させることはできない。このため、交通環境再現型での事故発生は、交通参加者が脇見、居眠り、飛び出しなど（事故発生要因）を行い、通常行動に復帰するまでに偶発的に事故が発生するか

どうかに依存する（図 2.4.1-1 参照）。通常の運転行動において、ドライバは脇見行動を行うがほとんどの場合は事故発生にいたらず通常行動に復帰し運転を続けることになる。

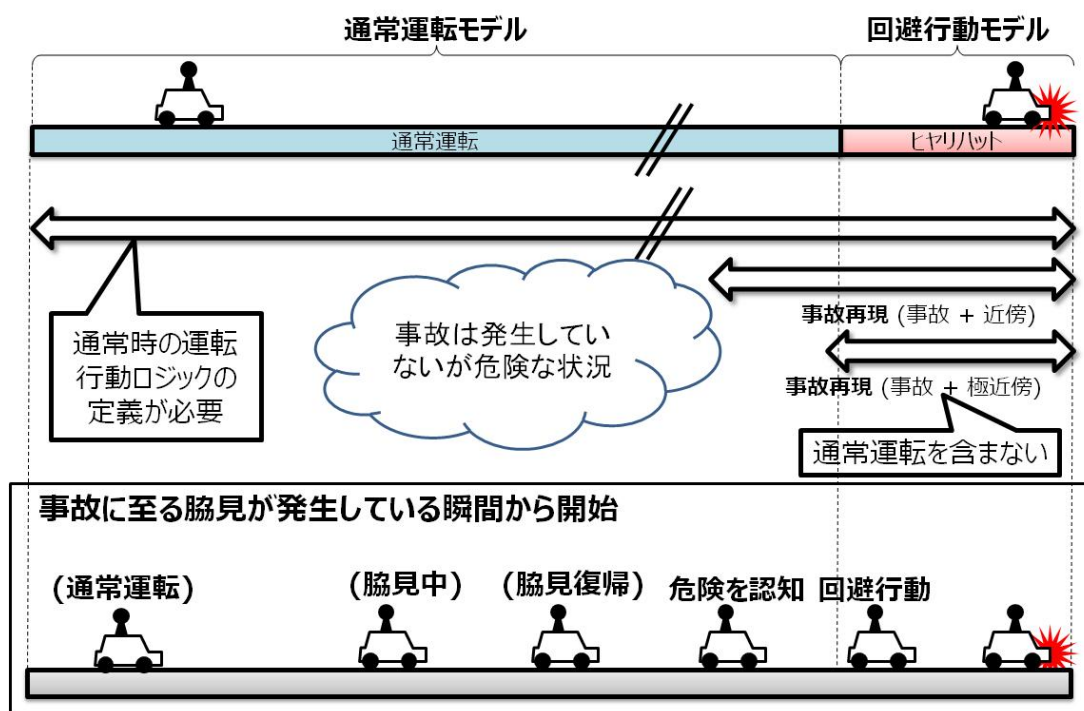


図 2.4.1-1 通常運転から事故発生にいたる行動モデルイメージ

図 2.4.1-2 に追従・追突事故発生要因の模擬としてドライバの知覚・認知エラーの考え方を示す。ドライバは、通常行動をしている中で、ある間隔でエラーが発生する可能性があり、発生した場合は、エラーの継続時間中はドライバの知覚処理をスキップする。このためシミュレーション上は短期記憶に情報が入ってこないで短期記憶にすでに格納されている情報（実際の周辺環境と異なる情報）に基づき処理を行う。

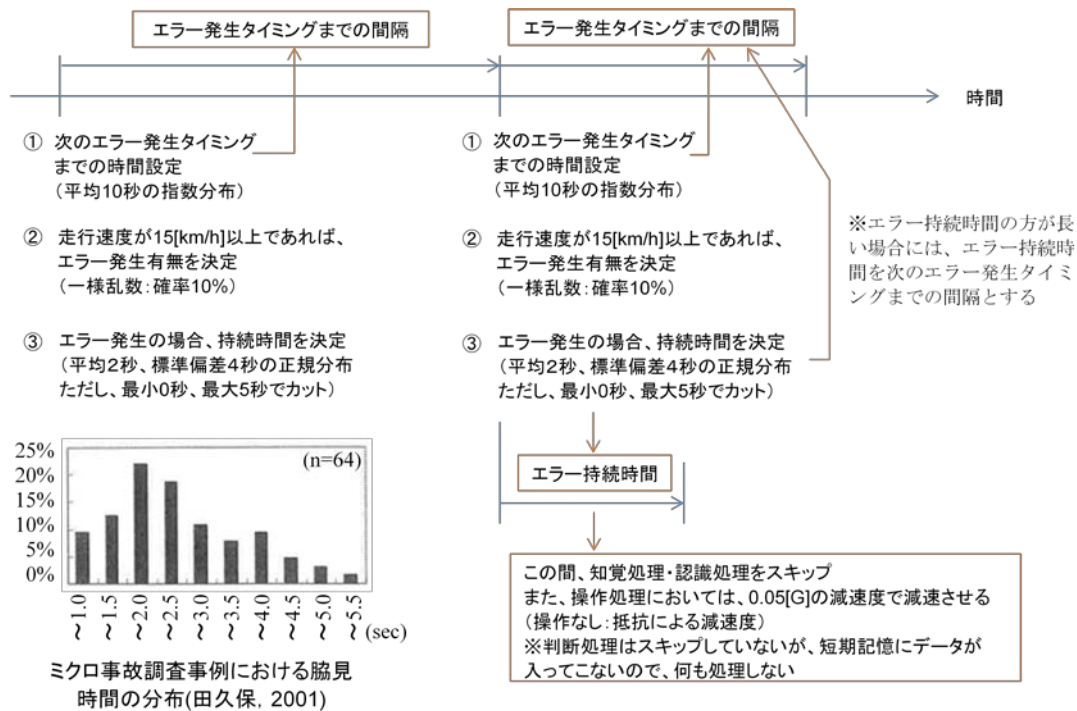


図 2.4.1-2 ドライバの知覚・認知エラーの考え方

前記の知覚・認知エラー要因だけでは、実際の追突事故を再現させることはできず、追従・追突事故の大きな要因である先行車の急減速を例として織り込んだ。

図 2.4.1-3 に示すように①割り込みによる先行車急減速の場合や、②歩行者などの飛び出しで先行車が急減速したりする状況を模擬するため、ドライバーエージェントに知覚・認知エラーが発生していない場合で減速を行うときに、一定の割合で急減速を行うようにした(一様乱数で 30%に設定)。



図 2.4.1-3 先行車の急減速

以上にて、交通環境再現型シミュレーションに追従・追突事故発生要因を織り込んだ。他の事故発生要因の織り込みについては 3.2 項にて詳細に述べる。

2.4.2 正面衝突事故再現の開発

交通環境再現型シミュレーションでの正面衝突事故については、2013年自技会交通事故予測シミュレーション検定検討委員会編「交通事故予測シミュレーションシステム検証マニュアル」²⁻⁹⁾に記載されている以下の(1)、(2)に示す事故を再現できるものとする。

(1) 正面衝突（カーブ路）

基本的衝突場面を図 2.4.2-1 に示す。

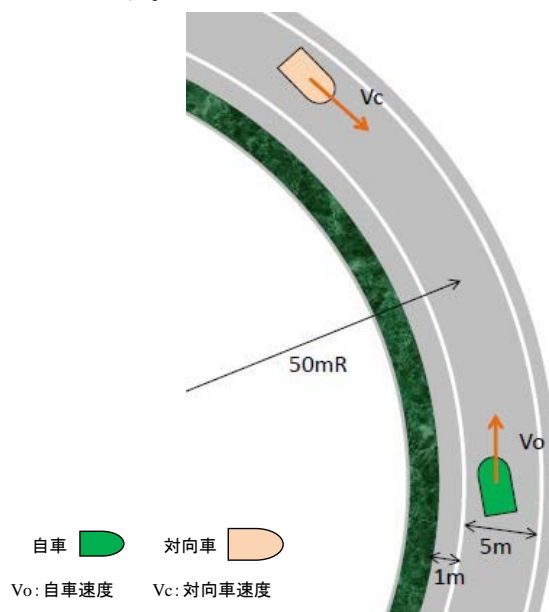


図 2.4.2-1 カーブ路における正面衝突

(2) 正面衝突（直線路）

基本的衝突場面を図 2.4.2-2 に示す。

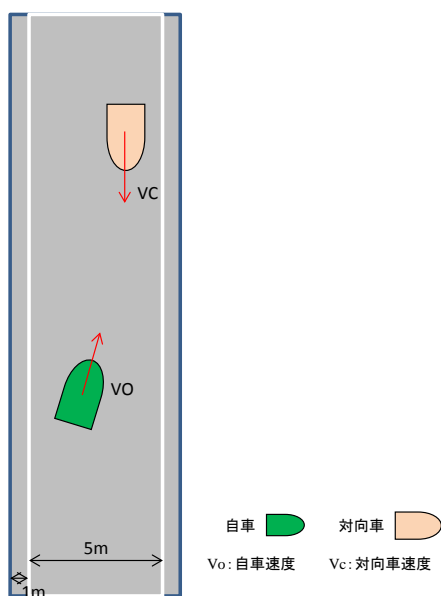


図 2.4.2-2 直線路における正面衝突

(1) (2) 共に自車ドライバの不適切なハンドル操舵により車両がセンターラインに向かい車線を逸脱し、反対車線の走行車両と車両前面部分で接触・追突する。今回開発した交通環境再現型シミュレーションでは、片側一車線の二車線道路上に多数の車両（ドライバ）を発生させ、ドライバの操舵制御に偶発的なエラーが発生した場合に対向車両との正面衝突事故が発生することを確認した。

正面衝突事故の再現には、2.3.2 項の道路エディタの開発にて作成した道路情報を使用した。今回作成した道路情報を図 2.4.2-3 に示す。茨城地区の一般社団法人日本自動車研究所（以下、「JARI」という）正門から谷田部 IC までの区間を作成しており、この区間において片側一車線の二車線道路で、正面衝突事故が発生しうる交通量の路線として、図 2.4.2-3 における水色の路線を対象とした。

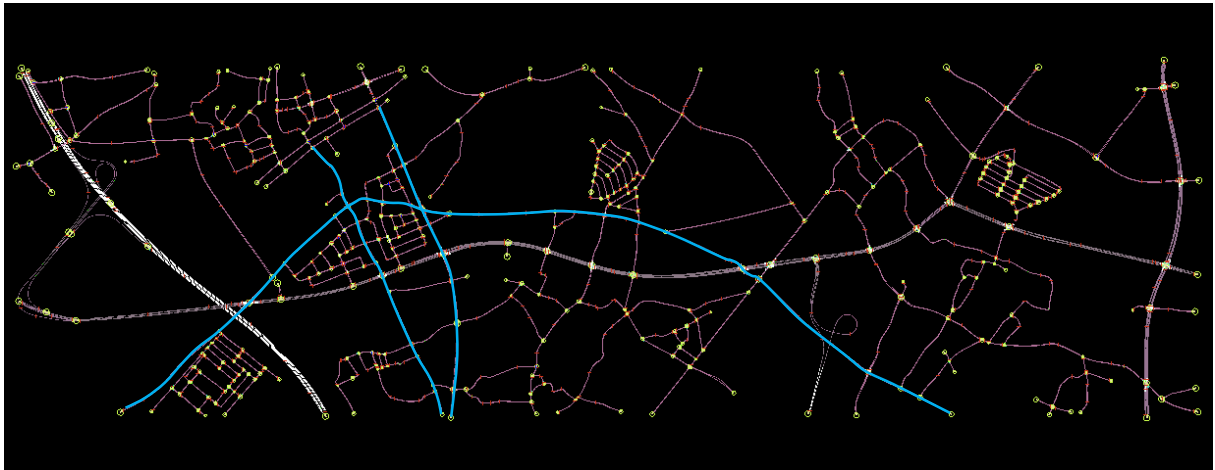


図 2.4.2-3 正面衝突を再現する道路

正面衝突を引き起こす車両の車線逸脱はドライバの操舵制御のエラーに起因するものとして、図 2.4.2-4、図 2.4.2-5 に示すように、対象車線走行中に自車両が操舵制御エラーにより舵を対向車線側に切り、エラー継続時間後正常運転に復帰するロジックを実装した。

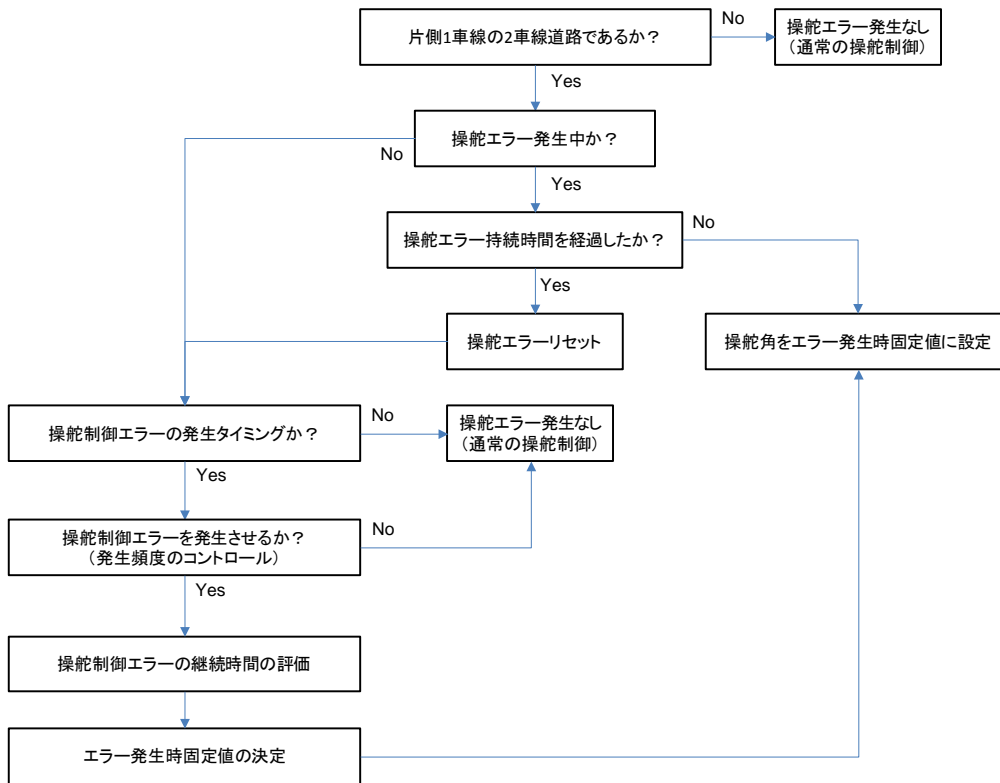


図 2.4.2-4 操舵制御エラーの発生ロジック

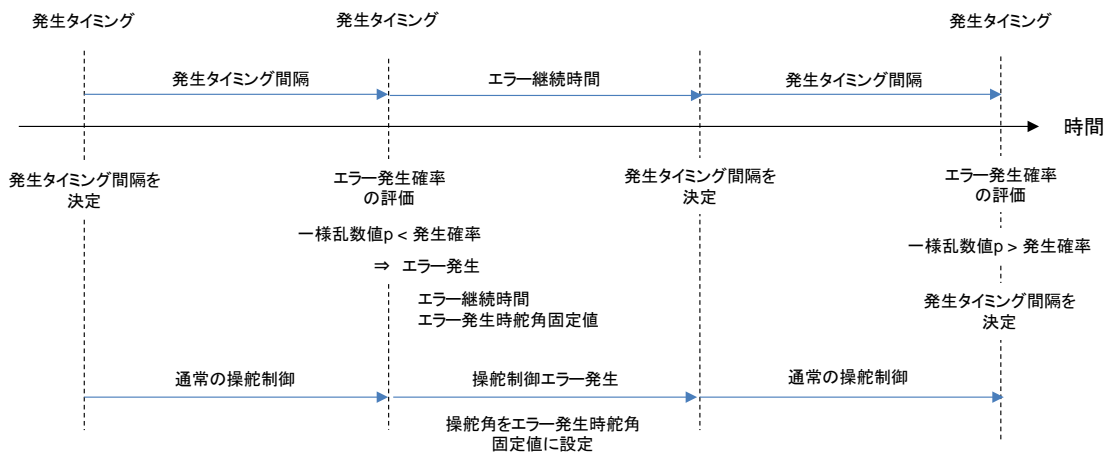


図 2.4.2-5 操舵制御エラー処理の時間軸でのフロー図

この操舵制御エラーのロジックでは、以下の3つの値を①から③の順番で決定する。

① 発生タイミング間隔

発生タイミング間隔は、指数分布に従う確率変数とした。今回開発した交通環境再現型シミュレーションでは、指数分布の平均値を 30[sec]として、ランダムサンプリングにより発生タイミング間隔を設定するようにした。

② エラー継続時間

エラー継続時間は、正規分布に従う確率変数とした。今回開発した交通環境再現型シミュレーションでは、正規分布の平均値を 3[sec]、標準偏差を 1[sec]として、ランダムサンプリングによりエラー継続時間を設定するようにした。

③エラー発生時前輪舵角固定値

エラー発生時の前輪舵角固定値は、次式により決定する。

エラー発生時前輪舵角固定値 = エラー開始時の前輪操舵角 + 舵角オフセット値

舵角オフセット値は、正規分布に従う確率変数とし、今回開発した交通環境再現型シミュレーションでは、正規分布の平均値を $-1[^\circ]$ 、標準偏差を $0.5[^\circ]$ として、ランダムサンプリングによりエラー継続時間を設定するようにした。正規分布の平均値が $0[^\circ]$ ではなくマイナス方向にシフトしているのは、平均的には対向車線へ逸脱をする方向に舵角固定値を設定するためである。また、ドライバの操舵制御エラーの発生頻度を調整するためのパラメータとして、 $[0, 1]$ の一様乱数を利用した頻度調整を行えるようにした。

上記ロジックにより、ドライバの操舵制御エラーを発生させて、正面衝突事故が発生することを確認した。図 2.4.2-6 に発生した正面衝突事故の 1 例を示す。

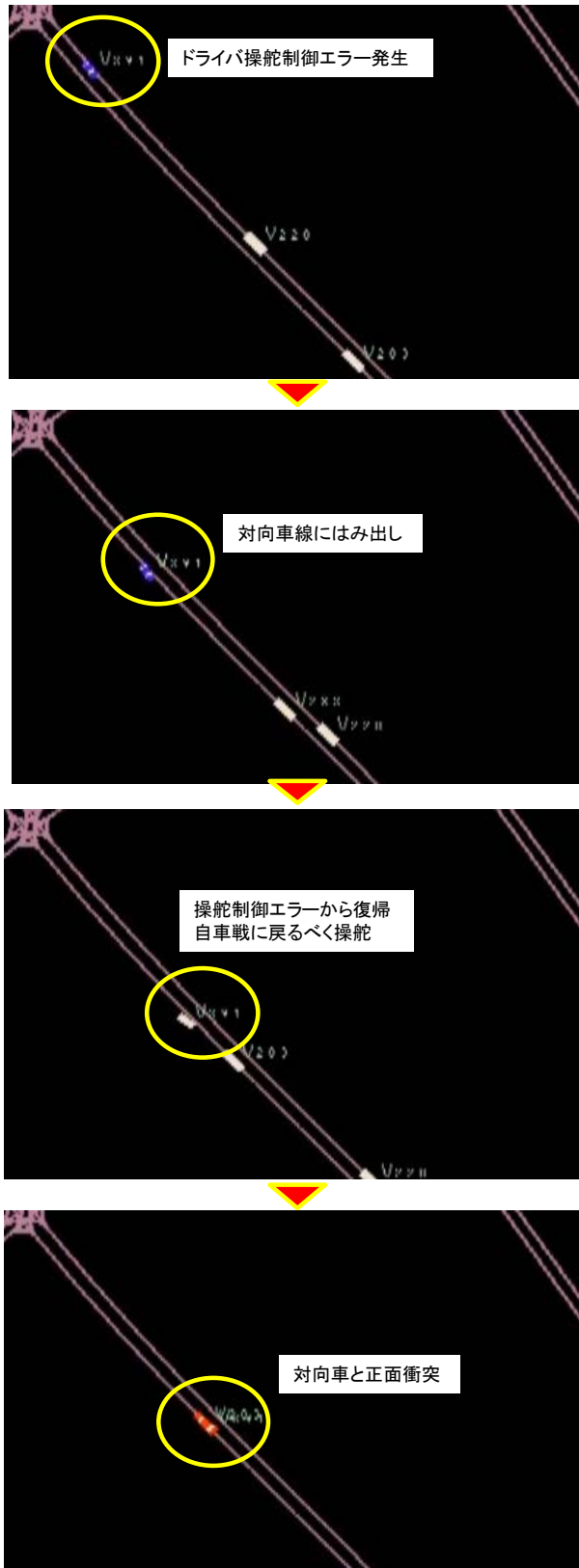


図 2.4.2-6 発生した正面衝突事故の 1 例

2.4.3 出会い頭の事故再現の開発

交通環境再現型シミュレーションでの出会い頭事故については、2013年自技会交通事故予測シミュレーション検定検討委員会編「交通事故予測シミュレーションシステム検証マニュアル」²⁻¹⁰⁾に記載されている以下の(1)に示す事故を再現できるものとする。

(1) 出会い頭（信号無し交差点）

基本的衝突場面を図 2.4.3-1 に示す。

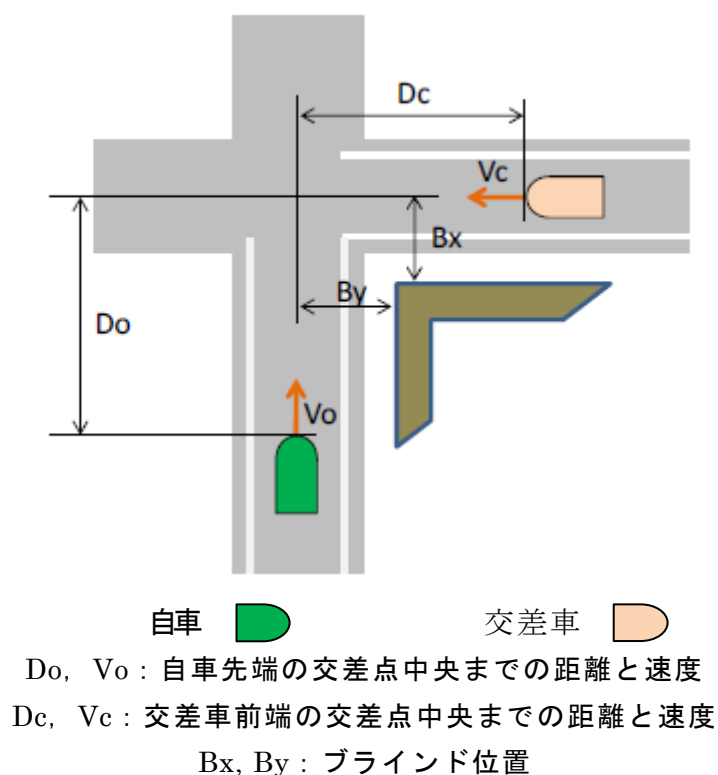


図 2.4.3-1 信号機のない交差点における出会い頭

自車は非優先側道路から信号無し交差点に進入し、交差車は優先側道路から信号無し交差点に進入する。自車は、交差点手前の一時停止位置にて一時停止して、交差車両との衝突の危険性を確認して、安全であれば交差点に進入すべきところを、安全不確認の状態でも交差点に進入する（安全確認手順のスキップ）ことにより、偶発的に優先側の交差車と衝突することを確認した。

正面衝突事故の再現には、2.3.2 項の道路エディタの開発にて作成した道路情報を使用した。今回作成した道路情報を図 2.4.3-2 に示す。茨城地区の JARI 正門から谷田部 IC までの区間を作成しており、この区間で出会い頭事故が起こりうる片側一車線道路の信号無し交差点として、図 2.4.3-2 において赤丸で囲った交差点を対象とした。

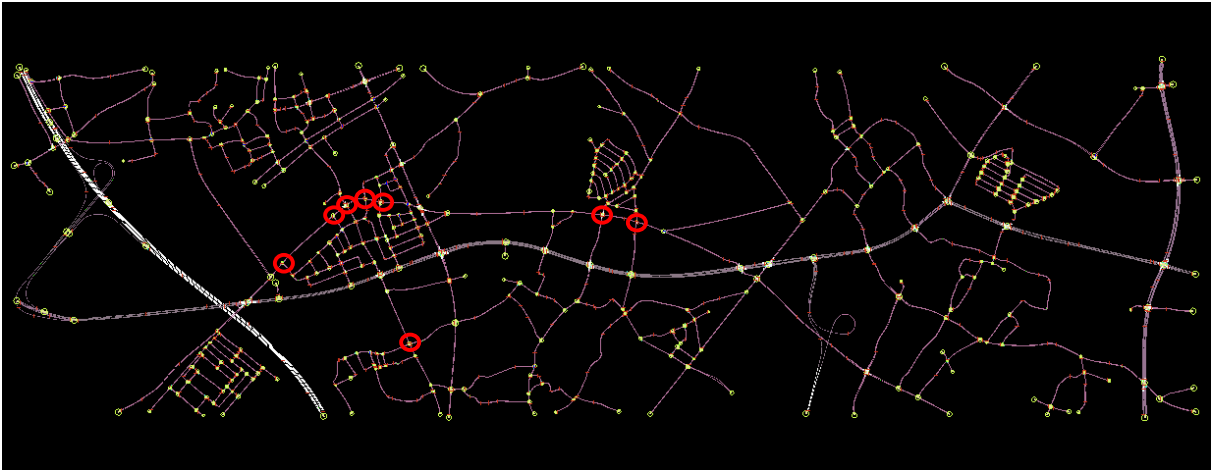


図 2.4.3-2 出会い頭事故の発生しうる片側1車線道路の信号無し交差点位置

出会い頭事故を引き起こす非優先側車両のエラー要因として、非優先側車両が信号無し交差点に進入するときにある確率で安全確認行動をスキップし、交差点で優先側車両と接触するロジックを実装した。安全確認行動スキップの詳細を図 2.4.3-3、図 2.4.3-4 に示す。

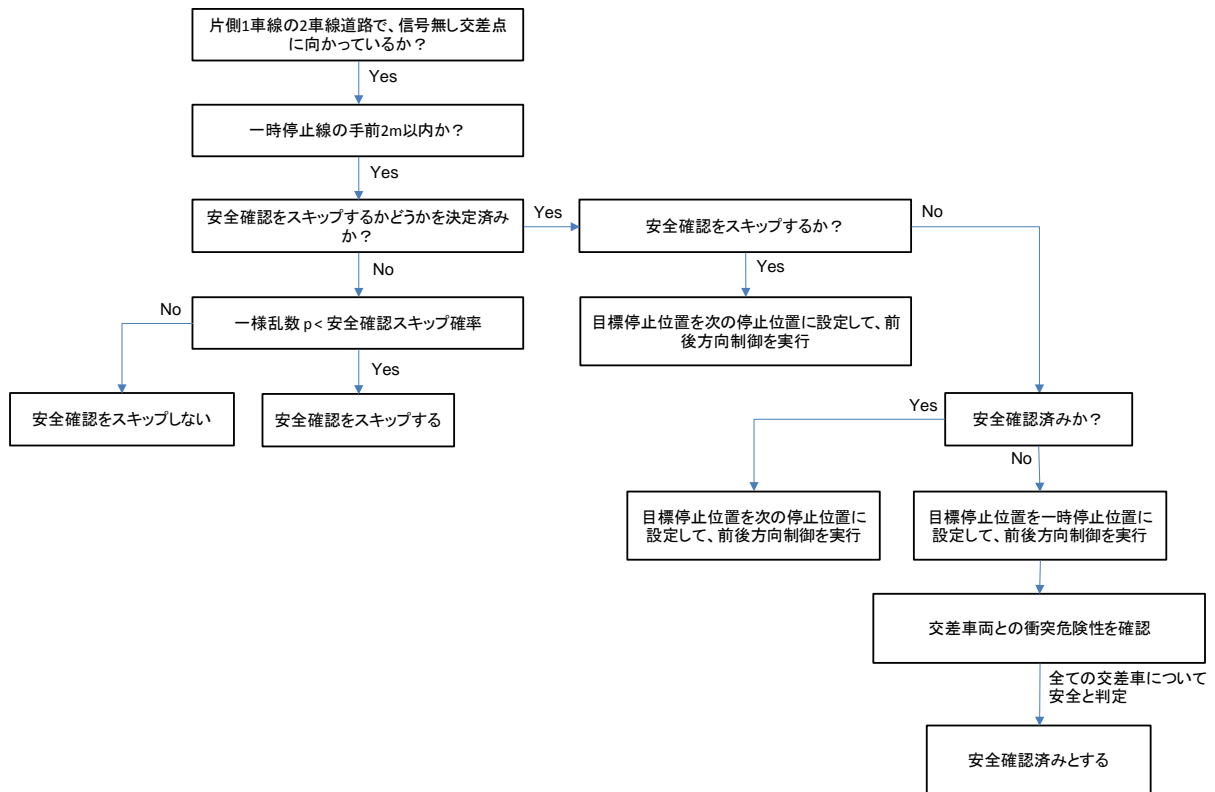


図 2.4.3-3 安全確認行動スキップのロジック

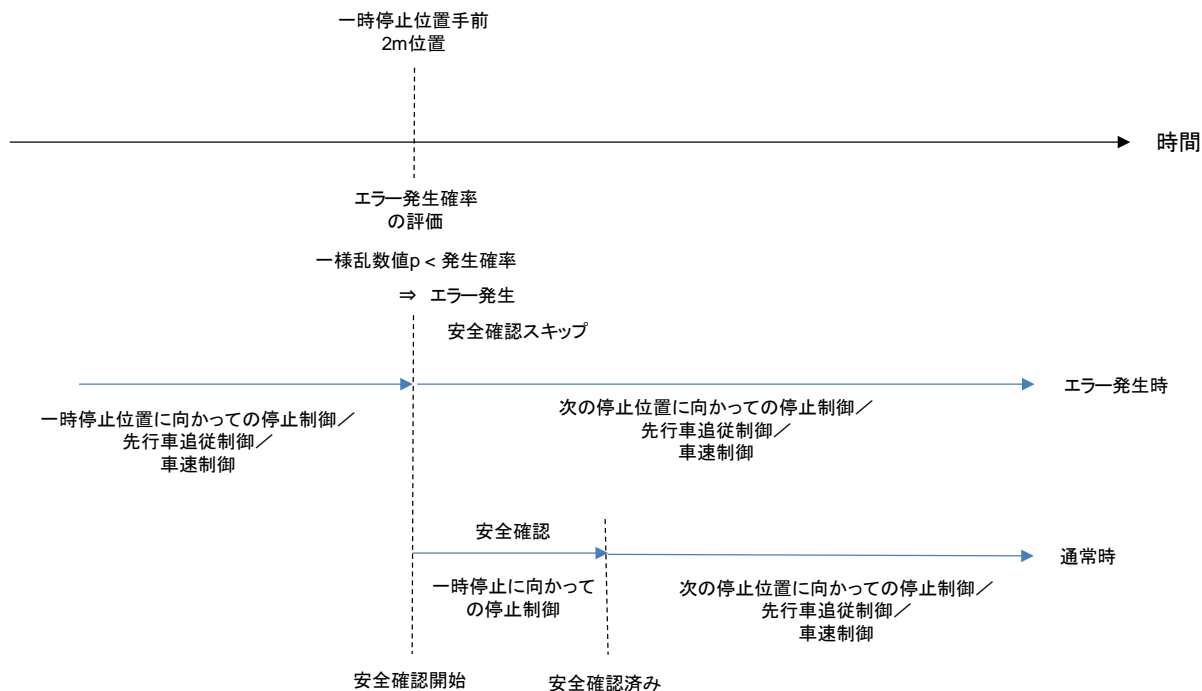


図 2.4.3-4 安全確認行動スキップ処理の時間軸でのフロー図

非優先側車両のドライバーエージェントが安全確認行動をスキップするかどうかは、 $[0, 1.0]$ の一様乱数による頻度調整ロジックにより決定した。このロジックで使用するスキップの確率値は、将来的には条件付き確率として、道路環境や交通状況、ドライバーエージェントの特性や状態によって変化させることになるが、平成 29 年度開発した交通環境再現型シミュレーションでは一定値とした。

交差車との衝突危険性は、自車が交差点に到達するまでの予想到達時間 $myTTCP$ と、交差車が交差点に到達するまでの予想到達時間 $cTTCP$ との差 $dTTCP = cTTCP - myTTCP$ に基づいて行う。具体的には、 $dTTCP$ の値が、

- $dTTCP < -aTTCP$: 安全 (交差車が交差点を通過後に自車が通過可能)
- $-aTTCP < dTTCP < bTTCP$: 危険 (交差車との衝突の危険性が高い)
- $bTTCP < dTTCP$: 安全 (交差車が交差点を通過する前に自車が通過可能)

と判断する。 $aTTCP$ と $bTTCP$ は、安全判断の閾値であり、ドライバーエージェントごとに異なるパラメータである。また、走行環境や交通状況、ドライバーエージェントの状態などに依存して変化するものと考えられるが、今回開発した交通環境再現型シミュレーションでは、 $aTTCP = bTTCP = 4.0[\text{sec}]$ で一定としている。

このような衝突危険性の判定を認知している交差車について行い、対象となるすべての交差車について $CrossCheckTime$ 秒の間、安全であると判断されたときに、安全確認済みとする。なお、対象となる交差車とは、自車が交差点を左折する場合は、右側の交差車であり、自車が交差点を直進あるいは右折する場合は、左側および右側の交差車である。交差

点を右折する場合は、交差車の安全確認に加えて、対向車の安全確認を行う必要がある。また、CrossCheckTime は、走行環境や交通状況、ドライバーエージェントの状態などに依存して変化するものと考えられるが、今回開発した交通環境再現型シミュレーションでは、CrossCheckTime = 1.2[sec]で一定としている。

自車が交差点に到達するまでの予想到達時間 myTTCP は、次式により算出する。

$$\text{myTTCP} = \text{my_dist_to_CP} / 2.7$$

ここで my_dist_to_CP は、自車から交差点までの距離で、2.7 は交差点を通過するまでの想定平均走行速度（平均 10[km/h]で交差点内を通過することを想定）である。

交差車が交差点に到達するまでの予想到達時間 cTTCP については、次式により算出する。

$$\text{cTTCP} = \text{c_dist_to_CP} / \text{cV}$$

ここで、c_dist_to_CP は、交差車から交差点までの距離で、cV は交差車の走行速度 ([m/s]) である。

上記に示した衝突危険性判定の方法を図 2.4.3-5 に図示する。

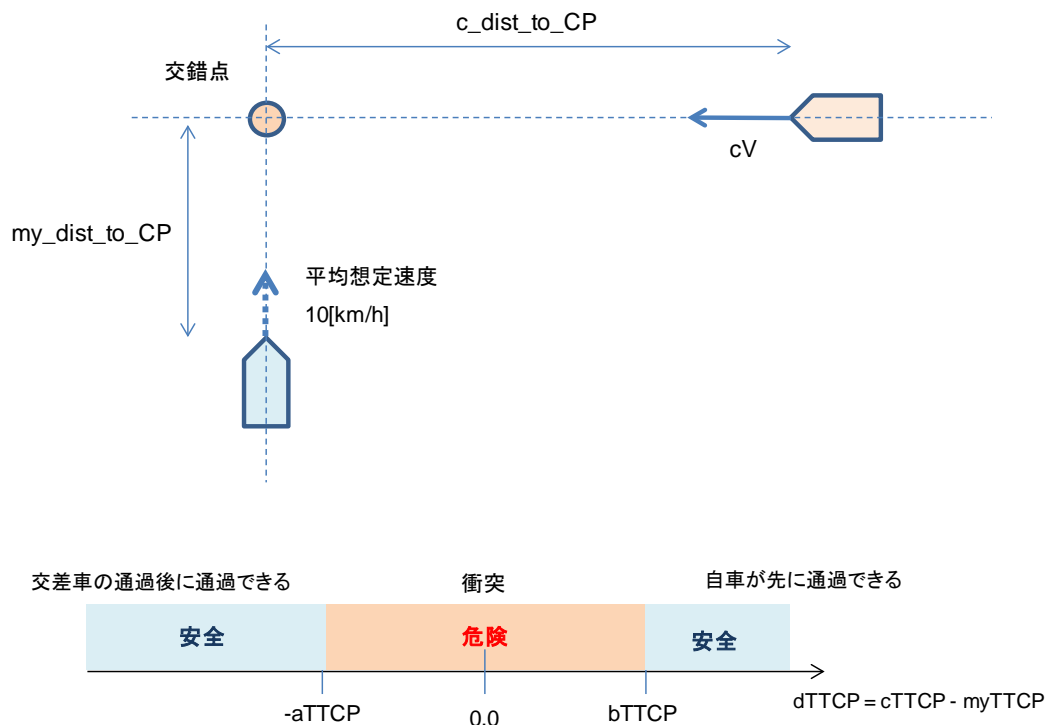


図 2.4.3-5 安全確認行動スキップ処理の時間軸でのフロー図

以上に述べたロジックにより、非優先側車両のドライバーエージェントに安全確認行動のスキップを発生させて、出会い頭事故が発生することを確認した。以下に発生した出会い頭事故の 1 例を図 2.4.3-6 に示す。

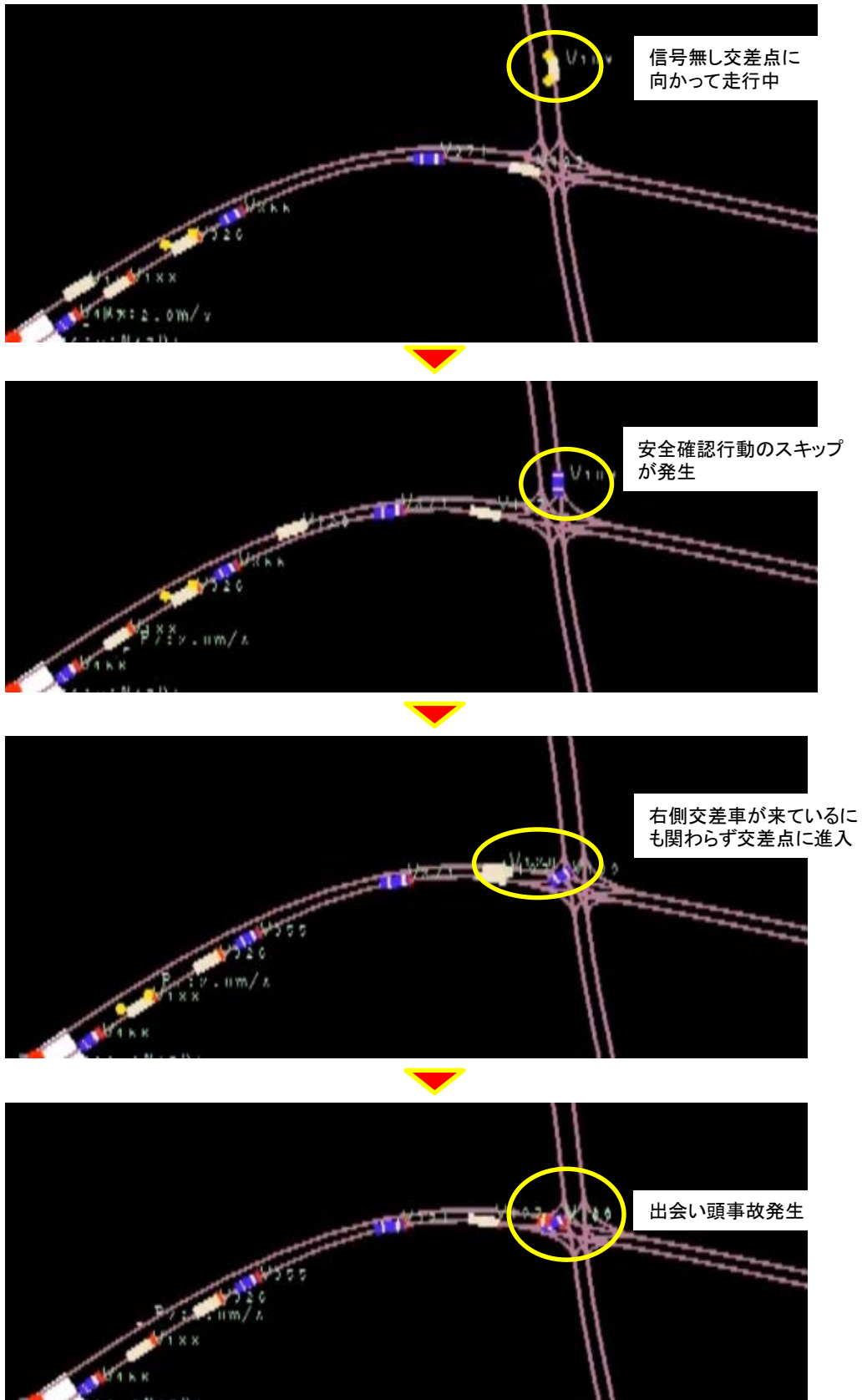


図 2.4.3-6 発生した出会い頭事故の 1 例

2.4.4 事故発生要因の検討

平成 27、28 年度開発のシミュレーションでは、事故発生要因として脇見、居眠り、速度超過、操舵の判断量、操作量の誤りを実装した。平成 29 年度は、2.4.1 項で述べた脇見、居眠りを統合・簡易化した知覚エラーを実装している。

病気による事故発生要因としては、居眠りの状態をベースとして、正常状態への確率的復帰が無いモデルで検討する。

飲酒による事故発生要因としては、覚醒水準が低下するとし、ドライバ行動の知覚・認知・判断・操作のサイクルを通常時より長くすることを検討する。あわせて、判断・操作誤りの発生確率についても通常より大きくする。

最後に自動走行システムに対する過信・不信などはドライバモデルの知覚・認知・判断・操作にどのような影響を与える可能性があるか研究し、モデルの開発が必要になる。シミュレーションとしては、不信・過信を表すパラメータをすでに実装済みでありこれをどのようにドライバモデルに組み込むかは、SIP 事業で行われている HMI タスクフォースの成果等を活用して進めていく。

2.5 交通環境再現型シミュレーションの外部インタフェース考察

本節では、MATLAB/Simlink や DS などの外部ツールと平成 29 年度事業で開発するシミュレーションとの接続可能性を検討した結果について述べる。2.2.1 項にて示したように交通環境再現型シミュレーションの接続インタフェースを公開することにより、外部ツールに接続するための中継ソフトを作成することが可能となる。

2.5.1 制御システム開発ツール（MATLAB/Simlink 等）との連携

交通環境再現型シミュレーションと制御システム開発ツールとを連携するためには図 2.5.1-1 に示すようにインタフェースの公開と道路構造データを共有化する必要がある。道路構造データの仕様も公開されるため、データ中継ソフトが道路構造データを読み込み、制御システム開発ツールが必要とする情報を生成して送信するようにすることで、制御システム開発ツール側の改修が最も少なく済むと考えられる。

交通環境再現型シミュレーション側では、制御システム開発ツールから送られてくる情報を、ドライバエージェントの内部情報に取り込む仕組みを実装する必要がある。取り込む情報は、以下の場合が想定される。

- (1) 制御システム開発ツール側で車両状態量まで算出していれば車両状態量を上書きする。
- (2) 制御システム開発ツールによる車両操作情報が送られてきた場合には、交通環境再現型シミュレーション側で車両状態量を計算し更新する。

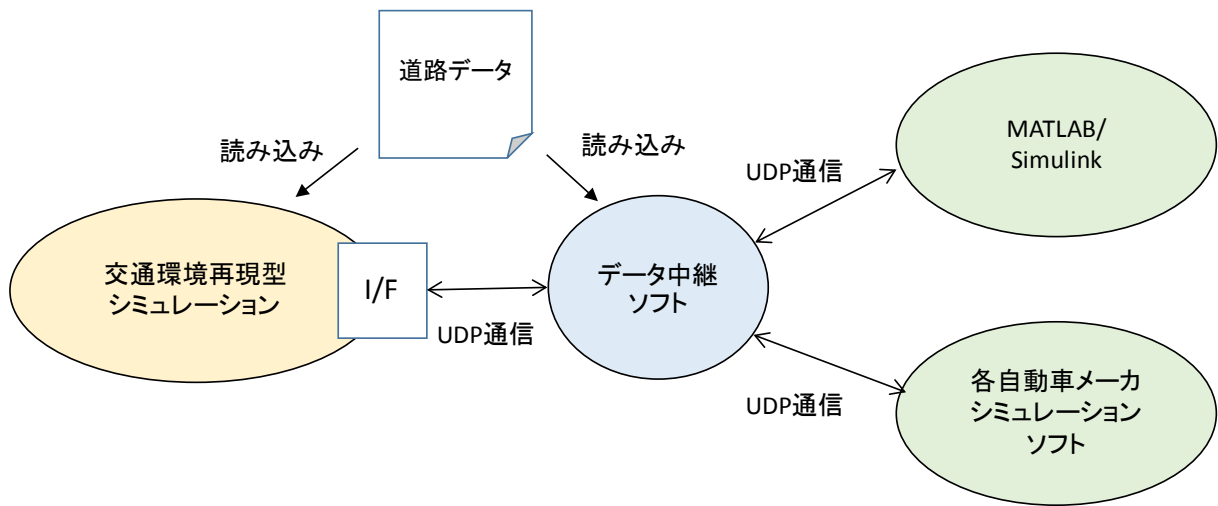


図 2.5.1-1 制御システム開発ツールとの連携スキーム

制御システム開発ツールと連携する場合、図 2.5.1-2 に示すように、制御システム開発ツールへ情報を送信後、制御システム開発ツールからのデータ受信を待つ仕組みとして、計算周期を同期させる。

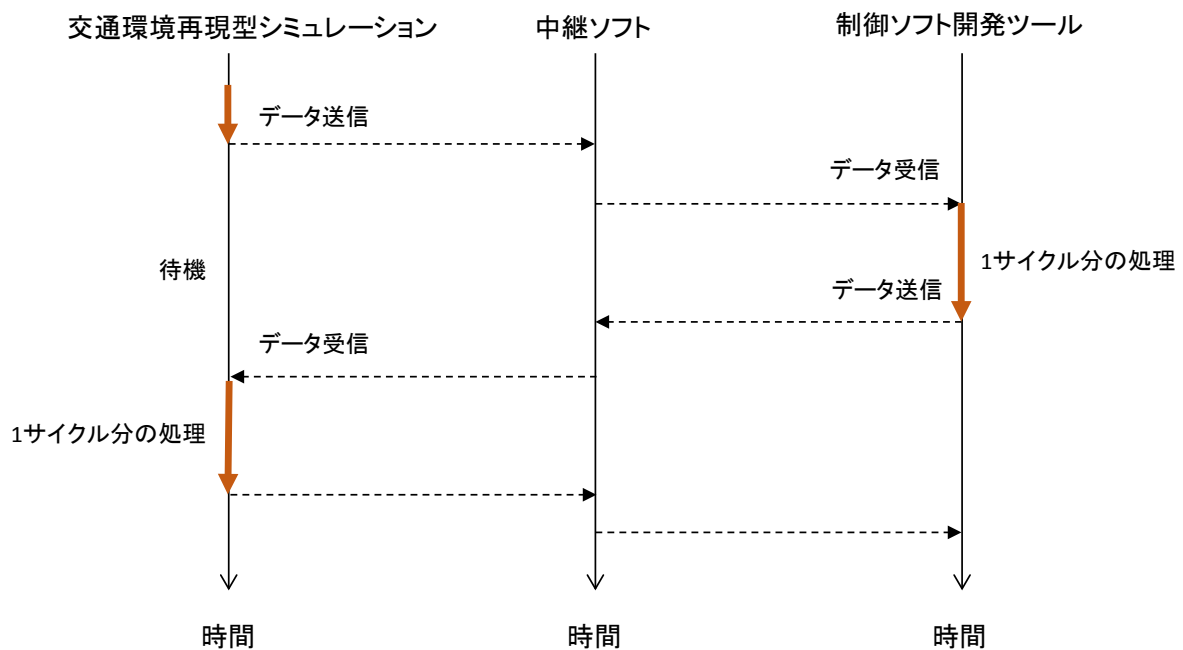


図 2.5.1-2 連携時の同期方法

2.5.2 ドライビングシミュレータとの連携

交通環境再現型シミュレーションと DS とを連携するためには図 2.5.2-1 に示すようにインタフェースの公開と道路構造データを共有化する必要がある。DS 側からは、DS 車両の

状態量のほか、DS側で制御しているシナリオオブジェクトの状態量が送信されてくる。交通環境再現型シミュレーションには、それらの情報を受け取ったらドライバエージェントの内部情報に組み込む仕組みを実装しなければならない。これにより、他のドライバエージェントは、DS車両やDS側で制御しているシナリオオブジェクトの行動を知ることができるようになり、相互作用が実現される。

DSとの連携においては、道路データをDSのマップに合わせて用意しなければならない。すでにDS側のマップが作成されているケースが多いと想定されるので、DS側マップを外部ツールによって変換する仕組みが必要となる。あるいは、ダイナミックマップやDRMなどの電子地図データをDS、交通環境再現型シミュレーション共通のソースとして、DS側マップおよび交通環境再現型シミュレーションの道路データを作成する必要がある。

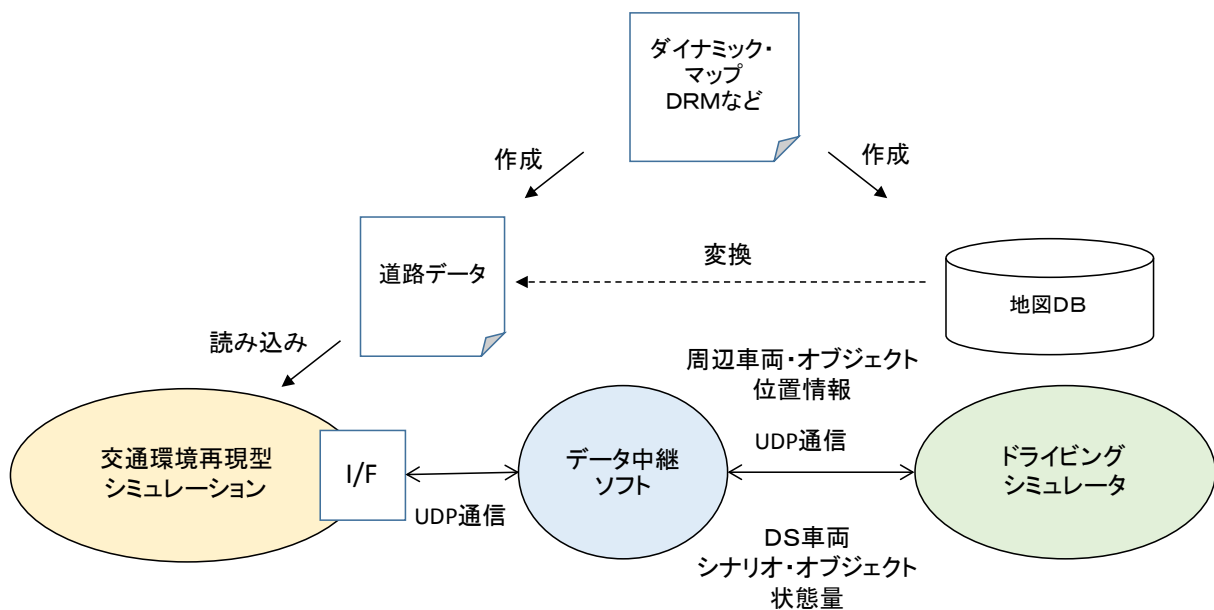


図 2.5.2-1 DS との連携スキーム

交通環境再現型シミュレーションは、連携するのが制御システム開発ツールであっても、DSであっても、データを送信して、外部システムからデータを受信して、内部情報を変更する、という仕組み自体は変わらない。送信するデータの内容ならびに通信フォーマットと、受信するデータの内容ならびに通信フォーマットを決定することにより、どちらにでも対応することができる。交通環境再現型シミュレーションと繋がるデータ中継ソフトが連携しようとする外部システム間の差異を吸収する部分なる。

2.5.3 外部システムとの連携のためのインタフェース

外部システムと連携して動作するために、交通環境再現型シミュレーションに、各オブジェクトの情報をUDP通信により送信する機能と、外部システムからのUDP通信を受信して、シミュレーション内オブジェクトにデータを組み込む機能を実装する。

図 2.1.1-2 のシミュレーションプログラムの基本処理フローに示したように、シミュレー

シヨンの1サイクルに1回ずつ、データ送信とデータ受信、およびデータの組み込み処理を行う。外部システムとの同期のために、データ送信後、データ受信処理では実際にデータが受信されるまで、処理をブロックすることが必要である。以下にUDP通信時に使用する(1)データ送信と(2)データ受信とデータの埋め込みについて述べる。

(1) データ送信

送信するデータ項目を表2.5.3-1から表2.5.3-4に示す。送信データの種類ごとに固定長パケットとし、1サイクルのデータ送信処理において、それを複数個送信する。たとえば、車両情報という送信データの場合には、1個のパケットは固定長であるが、それが何個送信されるかは、シミュレーション中の登場台数に依存し変化する。

表 2.5.3-1 送信するデータ項目

番号	送信データ種類	備考
1	車両データ	詳細は表 2.5.3-2 シミュレーションに出場している車両台数分だけデータを送信する
2	信号機データ	詳細は表 2.5.3-3 シミュレーションで稼働している信号機のみだけデータを送信する
3	交通参加者データ	詳細は表 2.5.3-4 シミュレーションに出場している交通参加者数分だけデータを送信する

表 2.5.3-2 車両データ

番号	送信データ項目	備考
1	車両 ID	
2	車種・サイズ・重量	大型車・乗用車等種別、幅、長さ、高さ、重量
3	重心座標、車両方位角	
4	車両速度、ヨーレート、前後加速度	
5	灯火点灯状態	ヘッドライト、ウィンカ、ブレーキランプ
6	システム搭載状況	ADAS / 自動走行システム
7	ドライバ状態	年齢、性別、特性パラメータなど
8	ドライバエラー発生状況	
9	関連道路構造データ情報	走行パス、経路データ

表 2.5.3-3 信号機データ

番号	送信データ項目	備考
1	信号機 ID、信号種別	自動車用、交通参加者用
2	設置位置、方位角	
3	現在の信号現示	
4	信号現示パターン	(現示、点灯時間) のペア
5	次の信号に変わるまでの残り秒数	
6	関連道路構造データ情報	ノード、制御する進入方向

表 2.5.3-4 交通参加者データ

番号	送信データ項目	備考
1	交通参加者 ID	
2	種別・サイズ・重量	歩行者・自転車別、幅、長さ、高さ、重量
3	重心座標、方位角	
4	移動速度	
5	交通参加者状態	年齢、性別、特性パラメータなど
6	交通参加者エラー発生状況	
7	関連道路構造データ情報	歩行者パス、経路データ

(2) データ受信とデータの組み込み

受信するデータ項目を表 2.5.3-5 から表 2.5.3-8 に示す。受信データの種類ごとに固定長パケットとして、1 サイクルのデータ受信処理において、それを複数個受信する。最後のデータ受信であることを示す終了パケットを受信するまで、データ受信処理を続ける。受け取ったデータは、データに指定されたシミュレーション内のオブジェクトの情報に組み込まれる (コピーされる)。

表 2.5.3-5 受信するデータ項目

番号	送信データ種類	備考
1	車両データ	詳細は表 2.5.3-6 受け取った車両データは、必要に応じて、シミュレーション内の車両オブジェクトに組み込まれる
2	信号機データ	詳細は表 2.5.3-7 受け取った信号機データは、必要に応じて、シミュレーション内の信号機オブジェクトに組み込まれる
3	交通参加者データ	詳細は表 2.5.3-8 受け取った交通参加者データは、必要に応じて、シミュレーション内の交通参加者オブジェクトに組み込まれる
4	終端データ	外部システムからの 1 サイクルあたりのデータ送信が終了したことを通知するためのパケット

表 2.5.3-6 車両データ

番号	送信データ項目	備考
1	車両 ID	シミュレーション内のオブジェクトの ID 番号
2	車種・サイズ・重量	大型車・乗用車等種別、幅、長さ、高さ、重量
3	車両状態量	重心座標、方位角、速度、ヨーレート、前後加速度
5	灯火点灯状態	ヘッドライト、ウィンカ、ブレーキランプ
6	操作量情報	アクセル、ハンドル、ブレーキ操作量
7	警報情報	ドライバへの警報

表 2.5.3-7 信号機データ

番号	送信データ項目	備考
1	信号機 ID、信号種別	自動車用、交通参加者用
2	現在の信号現示	
3	信号現示パターン	(現示、点灯時間) のペア
4	次の信号に変わるまでの残り秒数	

表 2.5.3-8 交通参加者データ

番号	送信データ項目	備考
1	交通参加者 ID	
2	種別・サイズ・重量	歩行者・自転車別、幅、長さ、高さ、重量
3	交通参加者状態量	重心座標、方位角、移動速度

2.6 まとめ

(1) 交通事故低減詳細効果シミュレーションの全体構造設計

マルチエージェントモデルをベースとした交通環境再現型シミュレーションの全体構造と、地図データを取り込むためのシミュレーション用道路構造の設計を行った。

シミュレーションの全体構造としては、交通環境の再現機能、再現した交通環境の中で偶発的に事故を発生させる機能、外部システムとのインタフェース機能に分けて設計することがソフトの独立性や将来の機能追加の点で有用であることを確認した。また、シミュレーション上で道路情報を使い易くするために必要な道路構造を、ウェイポイント、パス、ノード、信号機と分けて定義することとした。

(2) 交通事故低減詳細効果シミュレーション本体機能の開発

マルチエージェント機能を織り込むためのシミュレーション本体機能を、複数の交通参加者を制御するシミュレーション管理機能、マルチエージェントによる n 対 n の処理を行う車両エージェント機能、歩行者行動を定義する歩行者エージェント機能、道路情報の取り込み機能、ログ出力機能に分けて設計を行った。車両エージェントの開発においてはマルチエージェントに対応したドライバエージェントの交通参加者に対する知覚・認知方法と、本事業で想定する自動走行システム仕様を明確にし、シミュレーション上でどのように扱うかを決定した。

(3) 交通事故低減詳細効果シミュレーション周辺機能の開発

シミュレーションの周辺機能として、GUI 出力と道路エディタについてまとめた。GUI 出力では、シミュレーション実行状況をリアルタイムに確認できるように開発した。GUI 画面上で注目する車両を選択した場合その個別車両情報をメッセージエリアに出力し、周辺車両をどのように認知しているかは、画面上で周辺車両のタグとしてラベルを表示し状態認知ができるようにしている。道路データに関しては道路エディタの使用法説明と、SIP 事業で作成されたダイナミックマップの本事業での活用方法の検討についてまとめた。パスやノードなど主要な要素については、ダイナミックマップデータから自動的に変換用スクリプトを作成できる見込みを得た。また、交通環境再現型シミュレーションを行うためには、OD や交通量などの設定も必要となる。

(4) 交通事故低減詳細効果シミュレーションにおける事故再現技術の開発

交通環境再現型シミュレーション上で、偶発的に事故が発生するための事故再現技術について設計を行った。事故場面特化型と交通環境再現型での事故再現方法の大きな違いは、事故場面特化型では、特定の場面で交通参加者が脇見、居眠り、飛び出しなどを行うこと

により事故を再現させることができるが、交通環境再現型は通常の交通流を再現させているため、意図的に事故を発生させることはできない。このため、平成 29 年度開発の交通環境再現型シミュレーションでは、交通参加者のエラー行動により、異常状態が発生しそこから通常行動に復帰するまでの間に偶発的に事故が発生する機構を設計した。平成 29 年度は、事故発生要因の模擬としてドライバが、通常行動をしている中で、ある間隔でエラーが発生し、発生した場合は、エラーの継続時間中はドライバの知覚・認知処理をスキップする機構を組み込んだ。また、本機構を使用しシミュレーション実行領域を限定することにより、追突、正面衝突、出会い頭が交通環境再現型シミュレーションで再現できることを確認した。

(5) 交通事故低減詳細効果シミュレーションの外部インタフェース考察

平成 29 年度事業で開発するシミュレーションと制御システム開発ツール (MATLAB/Simlink) や DS などの外部ツールとの接続可能性に関して外部インタフェースの仕様を検討した。交通環境再現型シミュレーションの外部インタフェースを公開することにより、制御システム開発ツール (MATLAB/Simlink) 、DS に接続するための中継ソフトを作成することが可能となる。また、シミュレーションに必要な道路構造に関しても公開をすることで環境の共有化が行われると考える。

以上のことより平成 29 年度作成の交通事故低減詳細効果シミュレーションでは自動走行システム搭載車両を含む交通参加者がマルチエージェントとして機能し、交通環境を再現する中で偶発的に事故を発生させることが可能となった。

参考文献

- 2-1) 経済産業省：平成 28 年度経済産業省委託事業「戦略的イノベーション創造プログラム（自動走行システム）：交通事故低減詳細効果見積もりのためのシミュレーション技術の開発及び実証」
- 2-2) 経済産業省：平成 27 年度経済産業省委託事業「戦略的イノベーション創造プログラム（自動走行システム）：交通事故低減詳細効果見積もりのためのシミュレーション技術の開発及び実証」 P29-36
- 2-3) 経済産業省：平成 28 年度スマートモビリティシステム研究開発・実証事業「安全設計技術の開発」第 4 編 安全設計技術の開発 P IV-28 - IV-49
- 2-4) 経済産業省：平成 28 年度 SIP「交通事故低減詳細効果見積もりのためのシミュレーション技術の開発及び実証」成果報告書 p148-165
- 2-5) 経済産業省：平成 27 年度 SIP「交通事故低減詳細効果見積もりのためのシミュレーション技術の開発及び実証」成果報告書 p35-36
- 2-6) 経済産業省：平成 27 年度 SIP「交通事故低減詳細効果見積もりのためのシミュレーション技術の開発及び実証」成果報告書 p36-p39
- 2-7) 内閣府；平成 28 年度科学技術イノベーション創造推進委託 SIP 自動走行システムの実現に向けた諸課題とその解決の方向性に関する調査・検討におけるダイナミックマップ構築に向けた試作・評価に係る調査検討
- 2-8) 内閣府：自動走行システム向け地図データ符号化仕様への提案（試作データ用符号化仕様）Ver.1.0
- 2-9) 2013 年自技会：交通事故予測シミュレーション検定検討委員会編「交通事故予測シミュレーションシステム検証マニュアル」 P22-24
- 2-10) 2013 年自技会：交通事故予測シミュレーション検定検討委員会編「交通事故予測シミュレーションシステム検証マニュアル」 P27

第3章 交通参加者の行動モデルの構築

本章ではシミュレーションで模擬する対象の選定、および対象の振る舞いを具体的にどのように切り分けて扱うのかについて述べる。本事業のシミュレーションでは、事故低減効果算出の観点から、交通環境下で相互作用を生じる、ドライバと歩行者の振る舞いを実態に即して模擬することが重要である。ドライバについては先行研究を調査し、模擬の具体的な方法について検討を行った。歩行者については、統制環境下で実験を行い、属性ごとに振る舞いが異なることを明らかにした。

3.1 ドライバ行動モデルの構築

本事業で開発するシミュレーションはマルチエージェント型の交通環境再現型シミュレーションである。この型のシミュレーションは、個別のエージェントが相互作用を起こすことで、ある現象を模擬することができる。交通事故数の模擬を考えたとき、シミュレーション内のエージェントモデルが現実の交通参加者の行動をよく模擬した行動モデルでなければ、シミュレーション結果が十分に現実を模擬したものとはならない。想定するエージェントモデルの種類と振る舞いの定義が正確なシミュレーション実施の上で重要となる。

本事業は ADAS・自動走行システムによる事故低減効果見積もりを可能とするシミュレーションの開発を目的としている。これに資するシミュレーションは現実の交通事故を模擬できなければならないが、すべてを模擬することは困難である。本事業では模擬すべき事故の形態を、実際の事故を調査した統計結果より選択した。

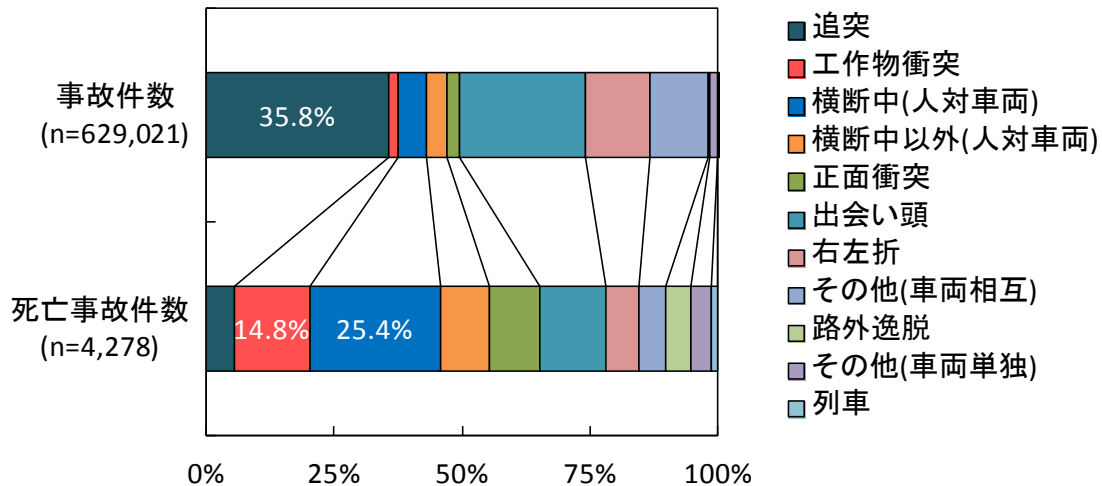


図 3.1-1 事故類型別の統計データ（平成 25 年）

図 3.1-1 に示す事故類型別の統計データを見ると、全件数の 75[%]以上を車両対車両の追突、横断中歩行者との衝突、自車の路外逸脱による衝突、出会い頭、右左折の 6 つの事故類型が占めている。残るものは、いずれも車両相互、車両単独のその他へ分類されている。また、6 つの事故類型は全死亡事故件数の 75[%]を越える割合を占めている。以上 2 点から、6 つの事故類型を対象とすることが具体的な事故事例として扱うことができること、低減効果を算出するのに、事故件数、死亡事故件数ともに十分と考えられる。

選定した事故の当事者となりうる交通参加者は以下の 4 通りである。交通参加者を模擬するエージェントはこの 4 種類に分類される。

【車両系のエージェント】

- ・ 車両エージェント
- ・ 二輪車エージェント

【歩行者系のエージェント】

- ・ 歩行者エージェント
- ・ 自転車エージェント

3.1.1 通常運転を模擬する行動モデルの開発

本事業で想定する ADAS、自動走行システムは四輪車のドライバーによる運転を補佐、または代替するものである。そのため、車両エージェントについては実際のドライバーと同様に、ドライバーエージェントによって操作される構造が必要である。これを実現するため四輪車のドライバーエージェントを開発した。

現実のドライバーによる運転行動は目標地点までの移動経路を計画して実行する「経路計画」の部分と、他の交通参加者の行動に対応して事故が生じないように車両を制御する「車両制御」に分けられる。

経路計画はシミュレーション上でドライバーエージェントが出場したとき、出発地点（出場地点）と目的地点を与えることが考えられる。また、経路の距離や移動時間などの関数である評価値が最小となる経路を選択し続けて目標地点へ到達する方法が有望である。

車両を制御する観点からドライバーの運転をみると「知覚・認知・判断・操作」の 4 段階に分けることができるといわれている。本事業のエージェントモデルはこの 4 段階に「短期記憶」を要素として加えている。現実のドライバーは計画された経路に沿って車両を操作して運転を行い、知覚された周辺交通環境の動きを一時的に記憶して認知と判断を行っていると考えられる。短期記憶はこの部分を模擬したものである。各要素は次の機能を有する。

(1) 知覚

周辺にいる他の交通参加者エージェントの情報を取得する。

(2) 認知

知覚によって取得された情報に対する意味づけや区別を行い、短期記憶へその情報を保存する。

(3) 判断

短期記憶に保存された情報をもとに、他の交通参加者エージェントと衝突しないこと、定義されたルールを遵守することを目的として、次に行う動作を決定する。

(4) 操作

自車両を移動させるために必要な操作を行う。

(5) 短期記憶

認知された情報を一定時間保持する。

上記の各機能が連携することで、周辺交通環境の変化に反応して自車両を操作するドライバエージェントモデルの機能が実現される。図 3.1.1-1 はドライバエージェントによる自車両の操作を模式的に表したものである。

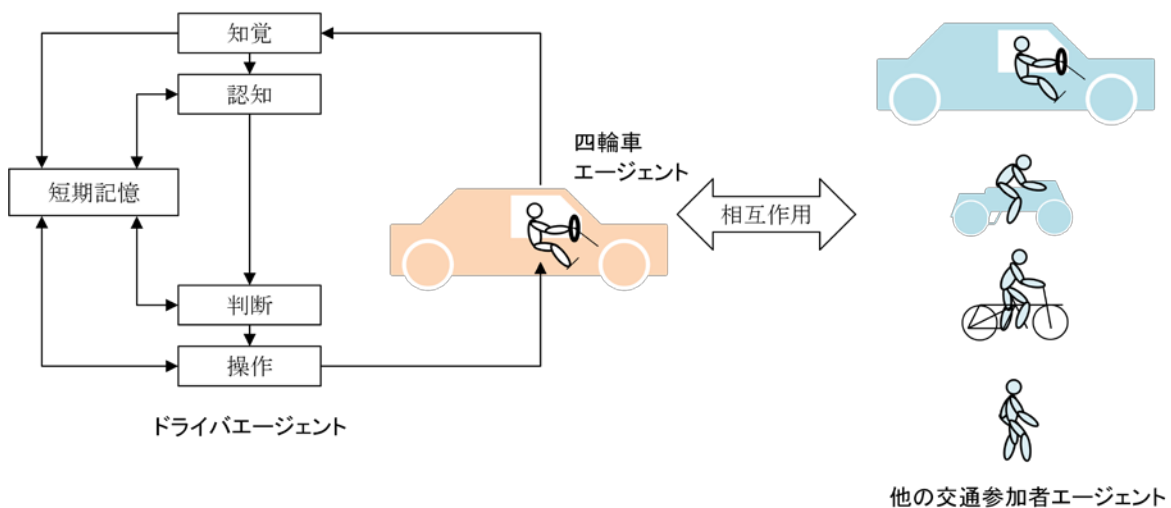


図 3.1.1-1 ドライバエージェントモデルの概要

ドライバエージェントは、図 3.1.1-1 で示したモデルで周辺環境を知覚してから操作によって自車両が動作するまでの一連処理を、定義されたルールや他の交通参加者との衝突が生じぬように操作する。そのため、知覚は理想的な状況で見落としなどが無いものとし、短期記憶での記憶間違いや忘却は無いものとする。これをもとに行われる認知や判断でも誤りは無いものとして、操作誤りも無いものとする。判断は日本の交通法規を参考として、他の交通参加者との衝突が生じぬ判断ルールを定義する。

なお、これらの特性は、ドライバごとに運転スキルが違うことから、運転傾向と結びつけて議論する必要がある。たとえば、操作の特性は運転経歴の長短によって大きく変化すると考えられる。統計調査等によって、ドライバの総数に対する運転経歴年数の分布を導き、特性に作用するパラメータとして定義することが望ましい。

3.2 ドライバエラー・不安全状態の実装方法の構築

シミュレーション内のドライバエージェントは図 3.1.1-1 の処理フローに従って情報を処理し、自車両を運転する行動を行う。処理フローはドライバのミスによる事故が発生しないように判断ルールが設定されている。つまり、物理的に不可避な、回避限界を超えて交通参加者エージェント同士が急接近しない限り、事故は発生しないようにシミュレーションが作られている。

このような考え方のもとでのドライバエラー・不安全行動とは、ドライバの情報処理過程が予め定義された処理フローとは異なる場合であるといえる。つまり、ドライバの内的な要因や外的な要因によって、知覚、認知、判断、操作と短期記憶の処理中に誤った情報を用いることや処理を省略することで、運転のエラーや不安全行動を模擬することができる。即ち、ここでのドライバのエラーとは、ドライバによる情報処理過程の誤りと定義される。

3.2.1 ドライバエラー実装方法の検討

本シミュレーションでは事故類型として、追従・追突、正面衝突、路外逸脱、出会い頭、歩行者横断の 5 種類を対象としている。図 3.2.1-1 はシミュレーションで模擬する事故の原因となったドライバの行動を事故統計データより調査した結果である。

事故類型別の死亡事故における四輪車ドライバの人的要因の構成率(H25年)

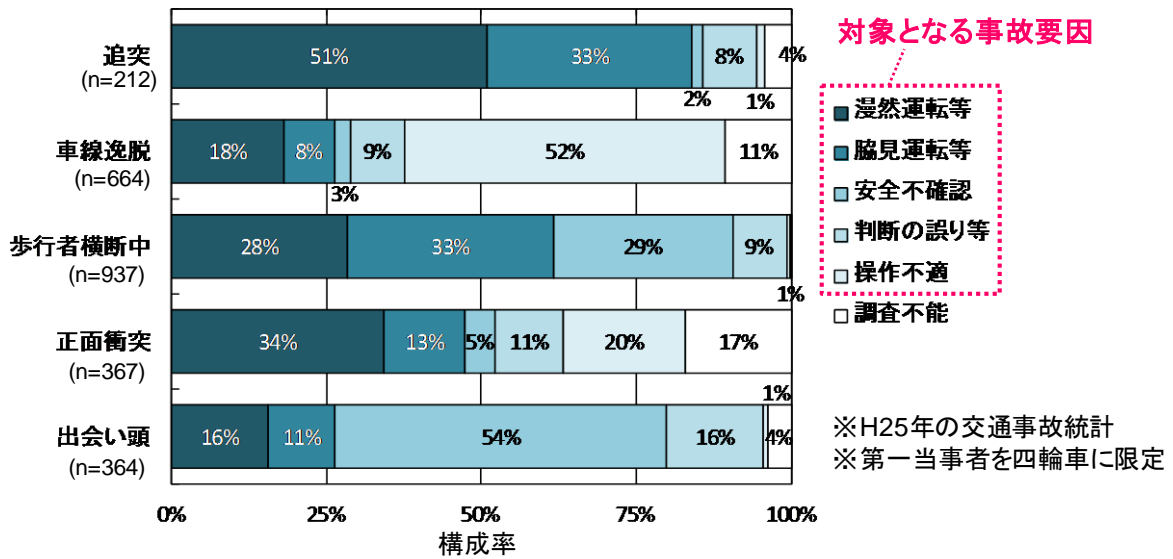


図 3.2.1-1 平成 25 年における事故類型別の死亡事故での四輪車ドライバの人的要因の構成率

今回対象とした事故は漫然運転等、脇見運転等、安全不確認、判断の誤り等、操作不適の要因によって発生していることがわかる。これらの要因が図 3.1.1-1 で示したドライバによる情報処理過程のうち、どの部分へ影響するものなのかを次に考える。想定したドライバエラーは以下の通りである。

(1) 知覚不能

ドライバの視野が阻害される、脇見を行うことにより、周辺の交通状況を知覚できていない状況を模擬する。

(2) 知覚誤り

知覚した結果の誤りであり、見落としや見間違いを模擬するものである。知覚された結果が情報を処理する過程で上書きされ、異なる数値となる状態である。

(3) 記憶・認知の誤り

短期記憶に情報を保存する際に誤った情報が保存されることを模擬している。たとえば、知覚して記憶していた歩行者の情報を忘れる場合や、先行車が走行し続けると思い込む状態を想定している。

(4) 判断の誤り

安全確認や確認の順序、定義されたルールに基づく判断を誤る場合を模擬する。

(5) 操作不能

疾病等により操作ができない状態を模擬する。

(6) 操作誤り

操舵や加減速の操作量が大きすぎる場合や、アクセルとブレーキの踏み間違いなどを模擬する。

これらのドライバエラーが単独、もしくは同時に発生することで対象とする事故の人的要因を模擬することができる。表 3.2.1-1 に模擬する人的要因とドライバエラーの対応関係の一例を示す。

表 3.2.1-1 模擬する人的要因とドライバエラーの関連の例

シミュレーションで 模擬すべき人的要因	要因となるドライバエラー
漫然運転等	知覚不能 知覚誤り 記憶・認知の誤り 判断の誤り
脇見運転等	知覚不能
安全不確認	知覚不能 知覚誤り 記憶・認知の誤り
判断の誤り等	知覚誤り 記憶・認知の誤り 判断の誤り
操作不適	操作不能 操作誤り

図 3.2.1-2 は情報処理過程とドライバエラーの関係を表した図である。

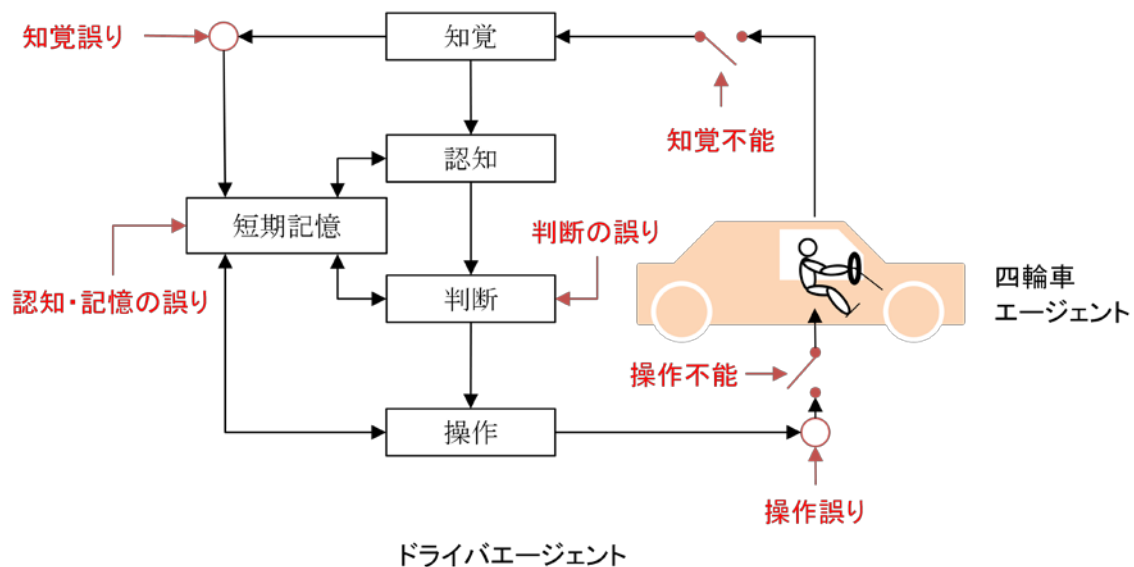


図 3.2.1-2 エラー状態を模擬できるドライバエージェントモデル

なお、上記のドライバエラーはある時刻で必ず起こるものではなく、ある条件下において確率的に発生する。これはドライバの個人特性に依存するものと、そうではないものが考えられる。たとえば、知覚誤り、認知・記憶の誤りや操作の誤りは人間の認知機能や動作の機能と強く関連している。これらを模擬するには、年齢を一つのパラメータとして条件を設定する必要がある。また、知覚不能によって模擬される現象の例として居眠り運転が挙げられる。居眠り運転はドライバが覚醒状態になれば発生すると考えられる。運転時間が長くなれば覚醒常態は低下する。知覚不能を生じさせるパラメータのひとつとして覚醒状態というパラメータを設定し、その変数のひとつに運転継続時間を設定することが妥当である。

3.2.2 不安全状態の実装方法の検討

不安全状態は二つに分けて考えられる。一つ目はドライバ個人の特性として情報処理に要する時間が短く、短期記憶に保存された断片的な情報のみを利用して走行するもの。二つ目は ADAS や自動走行システムが実現された場合に機能を過信して必要な運転操作を行わなくなる場合である。前者は運転特性として扱うものであり、年齢や個人特性、覚醒状態の水準などによってドライバエラーの発生確率が上昇することで表現することができる。後者は ADAS もしくは自動走行システム機能が正常に機能することで、機能に対するドライバの過信が高まり、ドライバが運転に必要な操作や情報処理を省略し始める状態で、ADAS や自動走行システムに固有の問題といえる。シミュレーション内部ではこれも模擬する必要もある。

不安全状態に対して、ADAS や自動走行システム機能がどのように機能するのもも模擬する。図 3.2.2-1 は ADAS が搭載された車両とドライバエージェントの相互作用を表し、

図 3.2.2-2 は自動走行システムを搭載する車両とドライバエージェントの相互作用を表している。不安全状態による情報処理の誤りは ADAS、自度走行システムによる補佐が期待されるが、過信による不安全状態はそのような補佐が続く中で生じると考えられる。

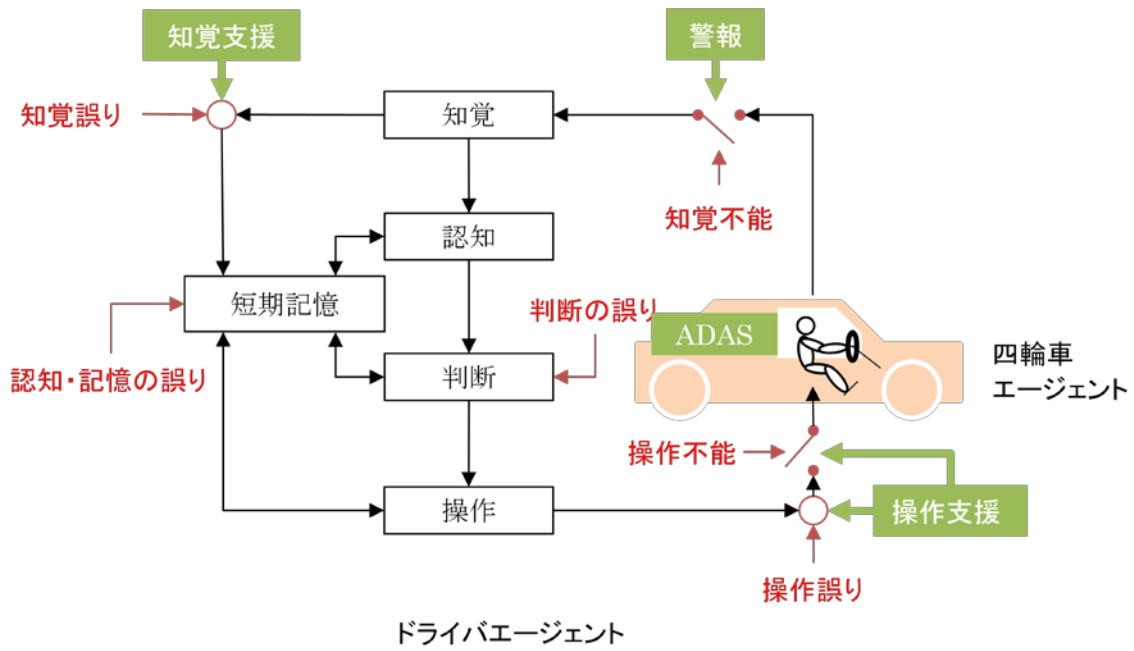


図 3.2.2-1 ADAS 搭載車両とドライバエージェントによる模擬

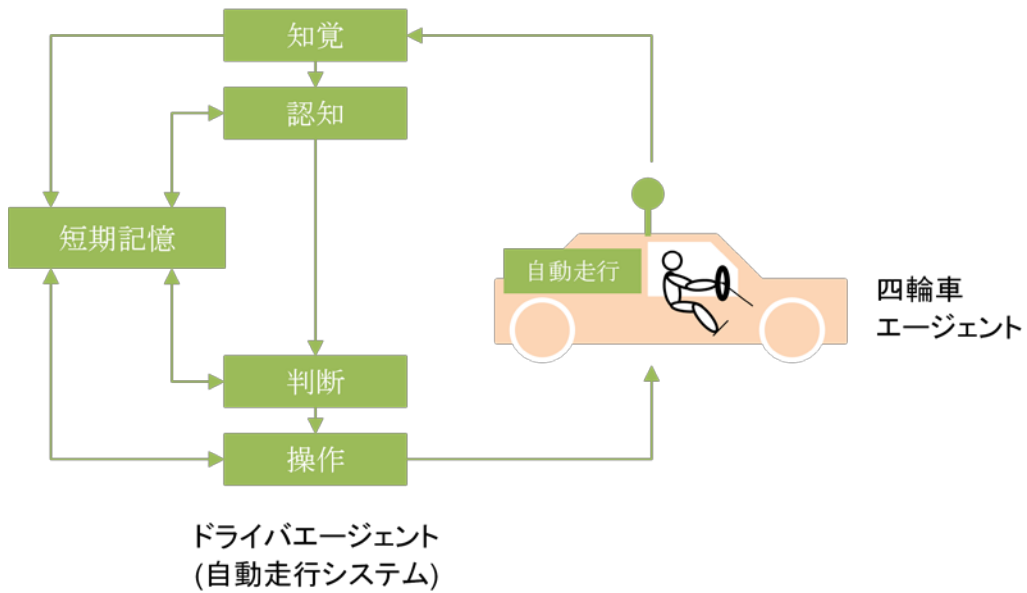


図 3.2.2-2 自動走行システムを搭載する車両の模擬

3.2.3 ドライバエラー・不安全状態の発生方法検討

ドライバエラーは、ある時間や場所に関する特定の条件が満たされたとき、一定確率で発生し、一定時間継続すると考えられる。その後、通常運転へ復帰する。交通事故の要因を調査した先行研究³⁻¹⁸⁾によれば、影響する要因とは走行場所、時間、交通状況の複雑さであると述べられている。つまり、これらはシミュレーションにおけるドライバエラーの発生の条件であり、これらの項目において特定の条件が満たされている間と、その後一定時間ドライバエラーを持続させれば実際のドライバによる事故の人的要因を模擬することに他ならない。本項ではまず、周辺交通状況、または周辺の交通参加者の行動と、ドライバがセカンドタスクに気をとられている場合や、疾病等の影響を受ける場合などの2つについて検討を行う。

(1) 知覚不能

車外や車内装置を注視していることによる脇見や、居眠りによりドライバは前方の状況を知覚できない状態に陥る。知覚不能のドライバエラーはこれらを総合して模擬しているため、ドライバが運転中に行う脇見などの実際の状況を先行研究より求めて参考とした。脇見の開始要因として車間時間、停車所要時間、回避限界車間距離を挙げており、これらに余裕があると脇見が開始されるとの研究結果³⁻¹⁰⁾と、脇見の継続時間は、道路線形にもよるが、正規分布の形状を持つとの報告がある。脇見の継続維持間と脇見状態が持続した後で通常運転へ復帰する際の特徴は、安部らによって検討がなされている³⁻¹¹⁾。追従走行において、脇見の発生頻度と継続時間は前走車とのTime Head Way (THW) で変化し、復帰した後でドライバがブレーキ操作を行うまでの反応時間は、前走車とのTHW、前走車の減速度に応じて異なるとの指摘がある。

以上まとめると、知覚不能を模擬するためには以下の点を踏まえた発生方法が必要である。

- ① 知覚不能な状態の発生は自車単独ではなく、周辺の交通環境に影響を受ける
- ② その継続状況は、走行している道路種別の影響を受ける。
- ③ 通常運転へ復帰するまでの遅れ時間は周囲の交通環境の影響を受ける。また、ADASの警報による支援はこれを短くする傾向がある。

(2) 知覚の誤り

ドライバは知覚により、対象が車であるか、歩行者であるか等、種類を判断して、その移動方向や速度の情報を得る。知覚の誤りは、このときに時間や場所によって取得する情報を誤らせるものである。ドライバがどのような状況下で認知を誤るのが明らかとなれば、このドライバエラーを合理的に発生させることができる。

(3) 認知・記憶の誤り

ドライバはハンズフリー携帯電話の使用など、運転以外のタスクがある状況では、対象物を知覚していてもそれを認知する過程が遅れる状況が指摘されている。ドライバエラーの原因は携帯電話の使用など、運転とは直接関連のないものであるため、別途、ハンズフリー携帯電話の使用状況等から求めることが望ましい。持続時間についても、会話状態にある中で継続すると考えることができるため、平均の通話時間などを調査して組み込む必要がある。ドライバエラーからの復帰について、会話をしている状態では反応時間に 0.2 秒程度遅れが増大すると示唆されている³⁻¹⁹⁾。

以上まとめると、認知・記憶の誤りを模擬するドライバエラーの作成方針は次の通りである。

- ① ドライバが運転とは関係のない副次的なタスクをどの程度行っているのかがドライバエラーの発生確率となる。
- ② 持続時間については運転との関連が少なく、電話等の継続時間がもとなり設定されることが望ましい。
- ③ エラー状態からの復帰には 0.2 秒程度遅れが生じる。

(4) 判断の誤り

通常運転では、ドライバは短期記憶に蓄えられた周辺交通環境の状況の予測や、認知で知覚された目の前の交通状況に基づいて操作を決定している。判断の誤りは交通法規などで定められた確認手順や優先通行の順番を逸脱して処理を行う場合である。これにより、右折一直進発信順序の錯誤による衝突事故などの原因を模擬することができる。

(5) 操作不能

疾病等により運転操作が不能になる場合を模擬する。先行研究³⁻²⁰⁾には、全国調査によるとドライバの急病死によるドライバ死亡交通事故は、全体の 8.3[%]であったとの法医学会による全国調査の結果が紹介されている。また、警察庁による「一定の病気にかかる運転免許制度の在り方に関する有識者検討会」の資料によれば、平成 2 年から平成 23 年で、発作・急病による交通事故件数は平均して 286 件である³⁻¹⁷⁾。このような調査結果を踏まえ、シミュレーション実行時に一定の発生確率で操作不能のドライバエラーを生起させることで実態が模擬できる。

(6) 操作誤り

アクセル、ブレーキの踏み間違えによる誤発進やペダル踏力の不足、カーブ走行時のハンドル操作の誤りを模擬するものである。高齢者に対して運転で気になることをアンケート調査した結果では、高齢者による運転では操作の誤りに関する関心が高いことが伺える

3.2.4 正面衝突場面・出会い頭場面に関する行動モデルの検討

(1) 出会い頭場面の模擬

場所によってドライバーが生起される場合の代表的なものは交差点である。この付近では他の交通参加者や自車の操作などを複数こなさなければならないため、比較的事故が生じやすいと考えられる。

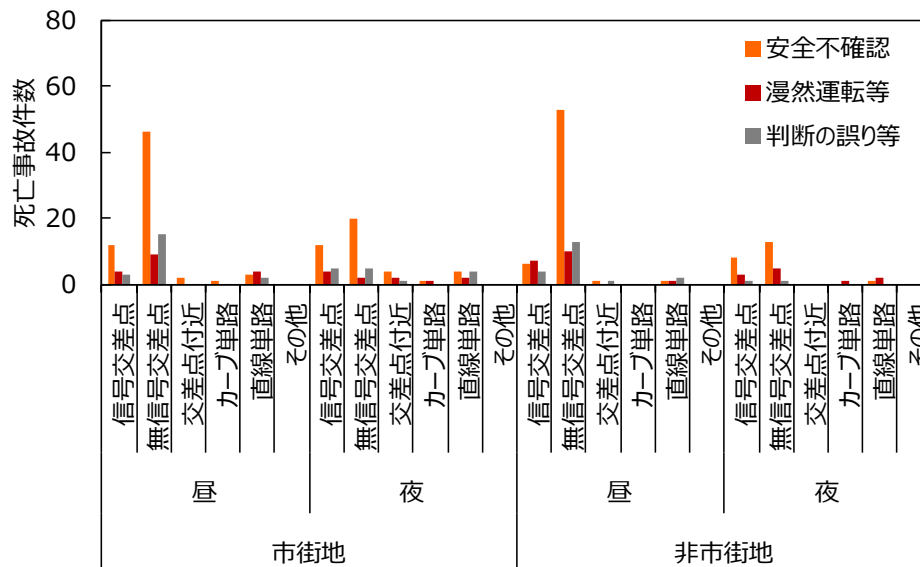


図 3.2.4-1 出会い頭事故の発生場所、時間帯、道路形状の別 (平成 25 年)

2013 年の出会い頭事故について発生場所、時間帯、道路形状の別を整理した図 3.2.4-1 からも、非市街地、市街地の両方で無信号交差点が 40 件を超えていることが明らかである。四輪車同士の出会い頭事故に着目した高橋の研究では、「出会い頭事故の多くは道路構造上の優先、非優先が明確に区別されていた場所で起きている」との指摘もある。また、同研究では第一当事者となる車両のドライバがぶつかって初めて相手の存在に気がついたという証言をしているとの紹介もある³⁻⁹⁾。これらのことから、場所に依存する事故の例として正面衝突を題材としたときのドライバーエージェントの行動を次の通り設定できる。

- ① ドライバエージェントが交差点付近にある。
- ② 認知・記憶の誤り、または、判断誤りのドライバーを発生させる。

(2) 正面衝突場面の模擬

正面衝突場面も場所に依存して発生すると考えることができる。今回考える正面衝突は、自車が車線を逸脱して工作物と衝突する場合や、自車が対向車線へはみ出した際に、対向車が近接したとき生じるものとする。これを実現するために、自車がどのような場所で車線を逸脱する傾向にあり、その原因が何であるかを調査した。

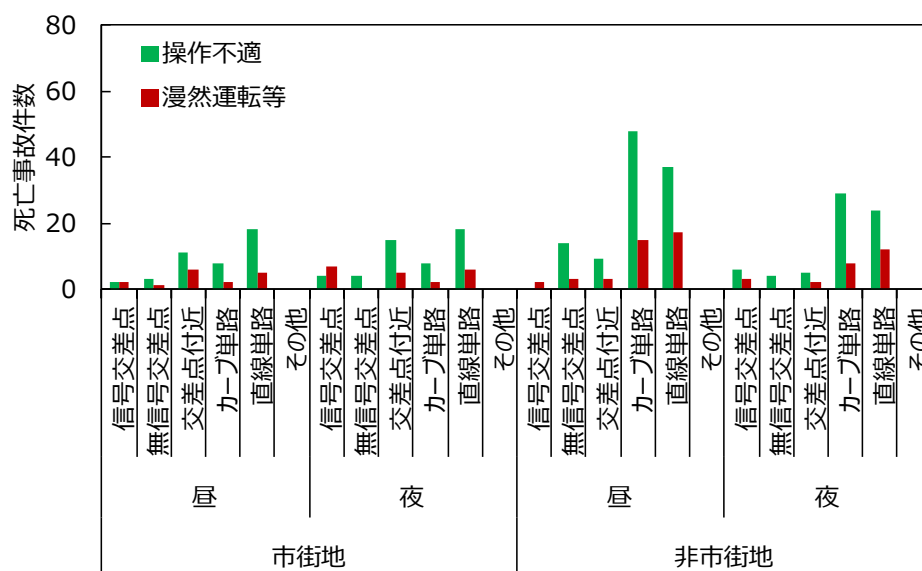


図 3.2.4-2 車線逸脱の事故が発生した場所、時間帯、道路形状の別（平成 25 年）

車線逸脱事故の発生場所、時間帯、道路線形について整理した図 3.2.4-2 より、非市街地のカーブ単路で操作不適による事故が多く発生している傾向がわかる。正面衝突や工作物衝突は運転初心者によく見られる事故であるとされる³⁻⁶⁾。この研究によると、下り右カーブの走行について、運転初心者と熟練者では、車線の維持を積極的に行う必要があるカーブ走行時に以下の傾向が見られる。

- ① 運転初心者は熟練者よりも、カーブ進入時の速度が高い。
- ② 運転初心者は加減速の操作量が、熟練者よりも全体的に、少ない。
- ③ 運転初心者の操舵は熟練者による操舵よりも大きい。

これらの傾向は、同じ情報を知覚、認知していても、運転初心者は安全な運転を実現するための操作が不足している状態だと考えられる。つまり、路外逸脱に関連するこれらの傾向は操作誤りのドライバーとして表現が可能である。

3.3 他の交通参加者のモデル化に関する検討

模擬する事故の当事者を調べ、四輪車以外の模擬について検討した。

まず、2013年における各事故の当事者を整理した。図3.3-1は追突の死亡事故の場合である。四輪車が第一当事者である場合は89.6[%]であり、第二当事者も四輪車である場合が36.9[%]、第二当事者が二輪車か自転車である場合は52.6[%]である。この中でも、特に、自転車が第二当事者となっている事故は43.8[%]である。一方、二輪車もしくは自転車が第一当事者となった事故の構成率は5[%]未満である。

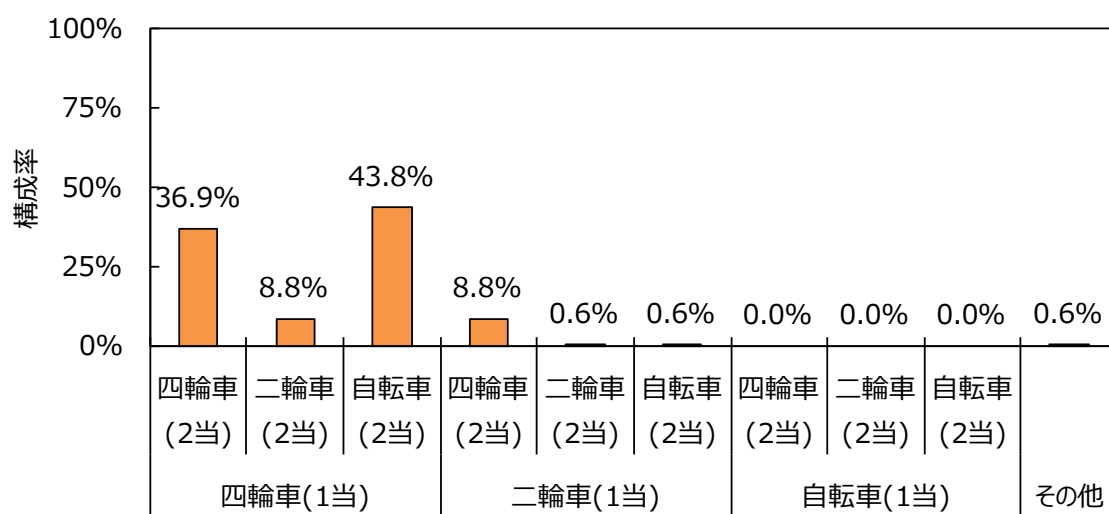


図 3.3-1 追突の死亡事故（160 件）における当事者ごとの車種別（平成 25 年）

図 3.3-2 は正面衝突について車種と事故当時車について整理した結果である。四輪車が第一当事者、第二当事者の両方である場合が構成率 79.9[%]であり、7.2[%]は第二当事者が自転車か二輪車であった。二輪車か自転車が第二当事者である場合は 12[%]程度である。

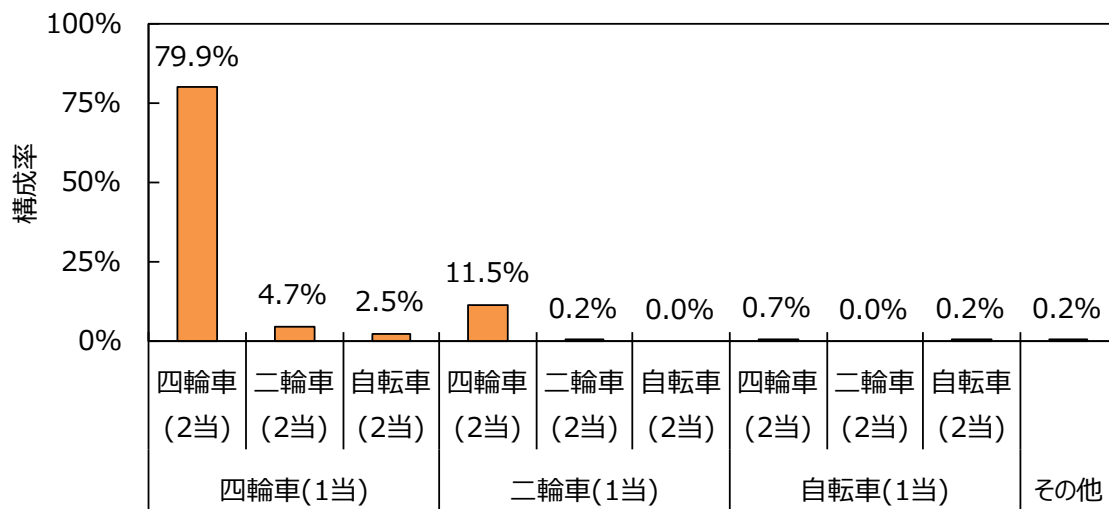


図 3.3-2 正面衝突の死亡事故（407 件）における当事者ごとの車種別（平成 25 年）

図 3.3-3 は出会い頭事故の場合である。四輪車が第一当事者の場合、第二当事者も四輪車であるものは 23.8[%]であり、第二当事者が二輪車か自転車のものは 41.5[%]である。二輪車もしくは自転車が第一当事者であるものは、34[%]程度である。

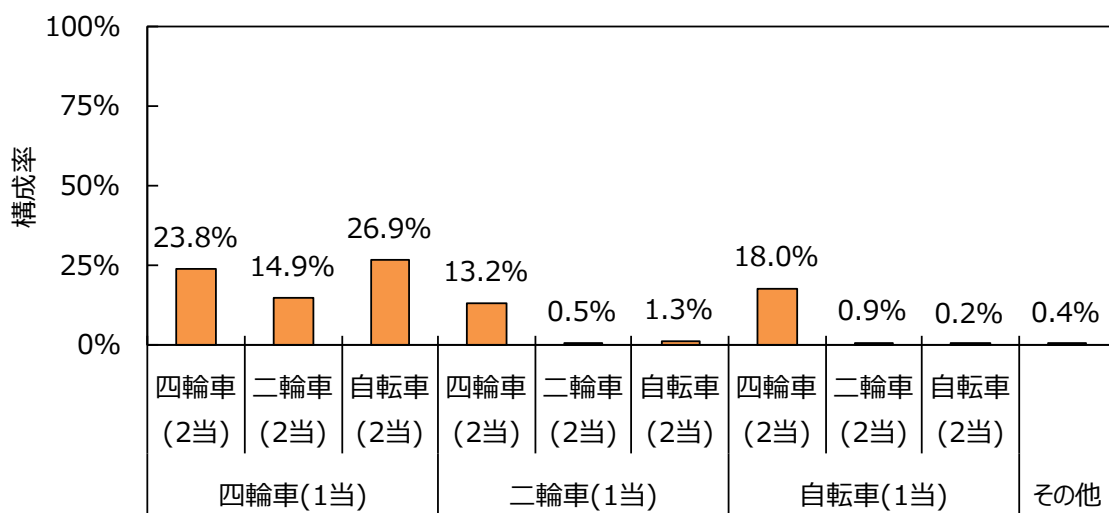


図 3.3-3 出会い頭の死亡事故（551 件）における当事者ごとの車種別（平成 25 年）

図 3.3-4 は右折時事故の場合である。四輪車が第一当事者となり、二輪車が第二当事者となる場合が最も多く、49.6[%]である。一方、二輪車もしくは自転車が第一当事者となる場合は 5[%]未満である。

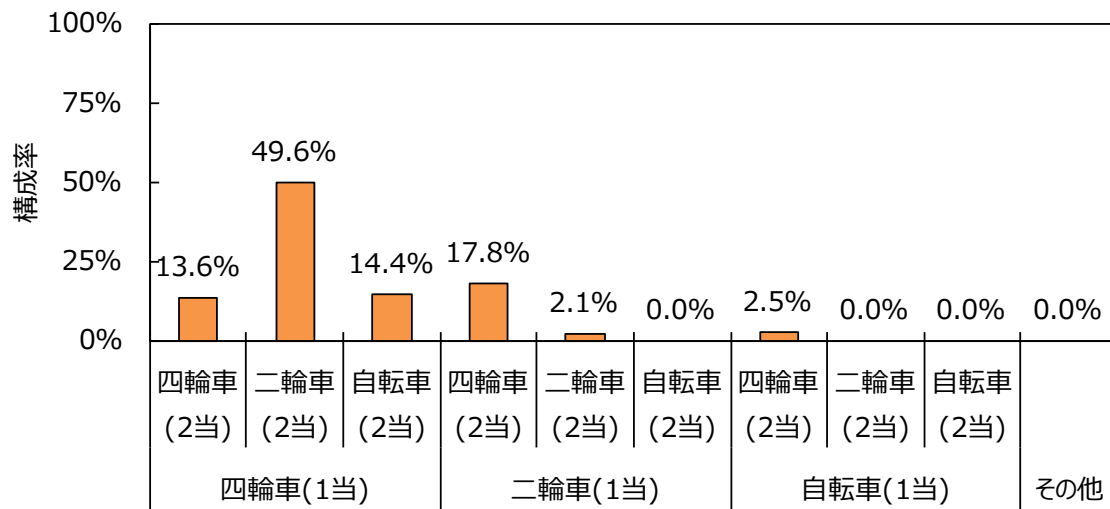


図 3.3-4 右折時の死亡事故（236 件）における当事者ごとの車種別（平成 25 年）

上記の統計結果から、四輪車が第一当事者となり、二輪車もしくは自転車が第二当事者となる場合が多く、その逆は少ないことが傾向として見られる。そのため、最初に述べた 6 類型の事故を再現するために、二輪車と自転車のエージェントは第二当事者として振舞えるだけの機能が求められ、ドライバエージェントモデル相当の機能を持たせることは必ずしも必要ではないといえる。

ITARDA交通事故統計用語解説集³⁻²¹⁾によれば、車両相互の場合、第一当事者、第二当事者の順は過失の程度と損傷の程度によって決定され、第二当事者はいずれか、または両方の軽い側であるとされる。これを踏まえると、二輪車、自転車のエージェントは出場地点と退場地点の間を法令に従って走行する機能があれば良いといえる。

3.4 交通参加者の行動モデル構築用のパラメータ取得のための調査・実験

本事業では、死亡事故の割合が最も高い横断歩道外を横断する歩行者の行動に焦点をあて、横断歩道外を横断する歩行者の挙動を再現する歩行者モデルの開発を行う。

平成 28 年度の検討事項として、歩行者エージェントモデルの横断特性パラメータの設定のための第一歩として、東京都葛飾区東金町にある二車線道路を対象として歩行者が道路を横断する様子を高所に設置したカメラによって定点観測を行い、横断歩道外を横断する歩行者の横断行動の実態の調査を行った。しかし、定点観測により得られるパラメータの分布や確率は、様々な歩行者の様々な条件下での横断行動が混合したものであり、歩行者ごと、条件ごと等に分離することができないという課題があった。そのため、モデルに使用する場合は、歩行者の属性が考慮されず、各パラメータ間に相関はないものとして扱われているので、実態に即さない歩行者エージェントモデルが発生する可能性があった。

そこで、平成 29 年度は、パラメータ間の相関や年齢等の属性を考慮したパラメータを確率や分布として歩行者モデルに実装するために、条件を統制した実験参加者実験を実施し、歩行者の横断歩道外を横断する行動の調査を行った。

本節では、歩行者が横断歩道外を横断する際の特性を明らかにするために行った実験による道路横断行動の調査の内容とその結果について示す。

3.4.1 実験環境と実験参加者

交通事故低減詳細効果を評価するシミュレーション開発に向けて、歩行者モデルのパラメータ間の相関性や、歩行者の属性とパラメータの分布の相関性について調査するため、図 3.4.1-1 に示す模擬道路で一般の実験参加者 88 名を対象として実験を実施した。実験参加者の属性別の人数を表 3.4.1-1 に示す。実験参加者は各年代から均等に募集し、各年代内においても年齢の違う実験参加者を募集した。実験の期間は 2017 年 9 月 7 日から 2017 年 10 月 8 日のうちの 13 日間で 9 時から 17 時の間に行い、1 人あたりの実験時間は 60 分程度である。

また、実験は図 3.4.1-2 の概略図に示すように 4 車線道路を 2 車線道路に見立てて実施した。なお、本実験は、日本自動車研究所の実験倫理委員会において実験時の安全確保策などが審査された上で実施に関する承認がなされた（受付番号 17-009）。



図 3.4.1-1 実験環境

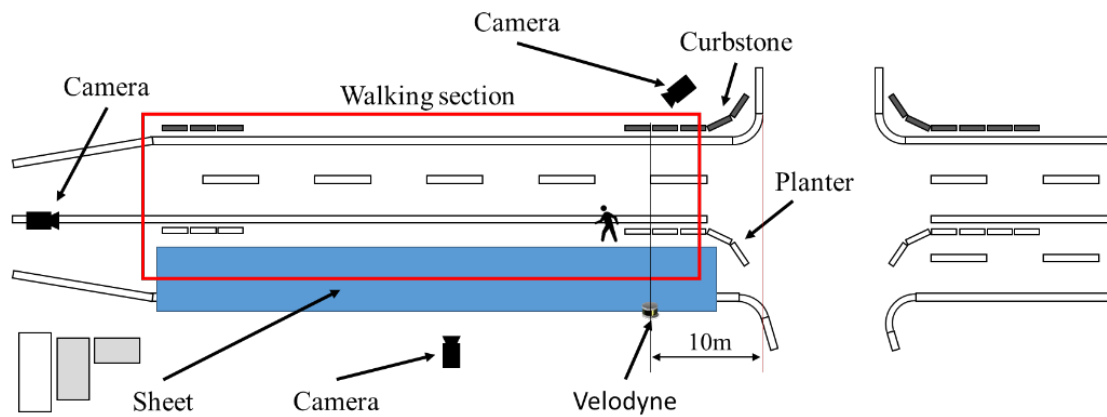


図 3.4.1-2 実験環境

表 3.4.1-1 被験者属性と人数一覧

属性区分	年齢[歳]	性別	人数[人]		平均年齢 [歳]
非高齢者	20~29	男性	6	8	24.1
		女性	2		
	30~39	男性	5	8	34.6
		女性	3		
	40~49	男性	5	12	44.2
		女性	7		
	50~59	男性	3	10	53.7
		女性	7		
	60~64	男性	1	1	62.0
		女性	0		
高齢者	65~69	男性	6	13	67.5
		女性	7		
	70~79	男性	18	33	73.2
		女性	15		
	80~89	男性	3	3	82.3
		女性	0		

3.4.2 取得パラメータと各パラメータの定義

本実験で取得するパラメータは以下に示すパラメータである。

- (1) 自由横断速度
- (2) 横断角度
- (3) 横断位置より手前で安全確認を開始する確率
- (4) 道路を横断中に首振り確認を行う確率
- (5) 横断を開始する TTC の閾値
- (6) 接近車両に対する横断速度

(1) の自由横断速度は付近に走行している車両および路上駐車などの障害物がない部分を横断（自由横断）している場合の、道路部分を歩行している時の歩行速度である。(2) の横断角度は自由横断している歩行者の横断角度で、道路に垂直な方向と横断開始位置から横断終了位置を結んだ線のなす角としている。(5) の横断を開始する TTC の閾値は、歩行者が道路を横断する際に「横断する」から「横断をしない」に変化した瞬間の接近車両到達予測時間（TTC）のことである。(6) の接近車両に対する横断速度は付近に歩行者に接近している車両が存在している場合の、道路部分を歩行している時の歩行速度である。

3.4.3 計測装置・方法

(1) 歩行者の位置の計測方法

歩行者の位置の計測に用いる装置の外観と一覧をそれぞれ図 3.4.3-1 および表 3.4.3-1 に示す。歩行者の位置の計測には図中①に示す LIDAR を用いた。なお、LIDAR で取得される 3次元点群から歩行者を識別する方法と位置を算出する方法については平成 27 年度の開発項目の「レーザーレンジファインダを用いた計測手法」を用いて行った。

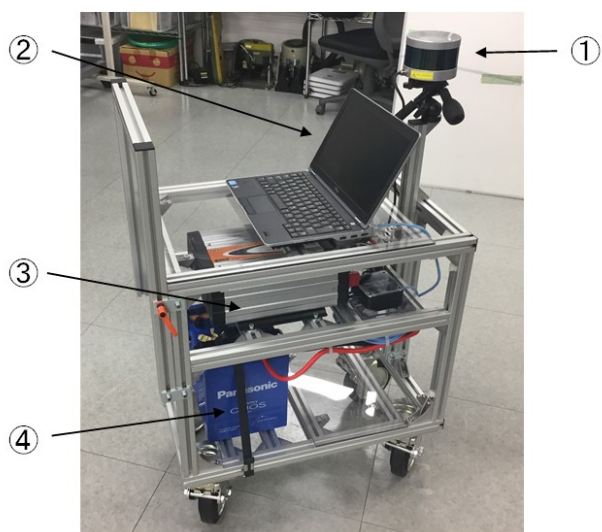


図 3.4.3-1 歩行位置計測装置

表 3.4.3-1 計測装置の詳細

図中 番号	名称	機能
①	LIDAR (VLP-16)	位置情報を取得する
②	PC	LIDAR のデータを記録する
③	インバータ	バッテリーからの電力を変換する
④	バッテリー	電力を供給する

(2) 歩行者の首振り挙動の計測

歩行者の首振り挙動の計測に用いる装置の外観と一覧をそれぞれ図 3.4.3-2 および表 3.4.3-2 に示す。歩行者の首振り挙動は、表 3.4.3-2 の②に示す IMU を用いて計測する。この IMU では三軸の加速度と三軸の角加速度を計測することができる。また、それらの加速度データから姿勢角を算出することができる。このセンサを頭と腰に装着することで、頭の向いている方向と身体の向いている方向を求め、被験者の首振り挙動を取得する。

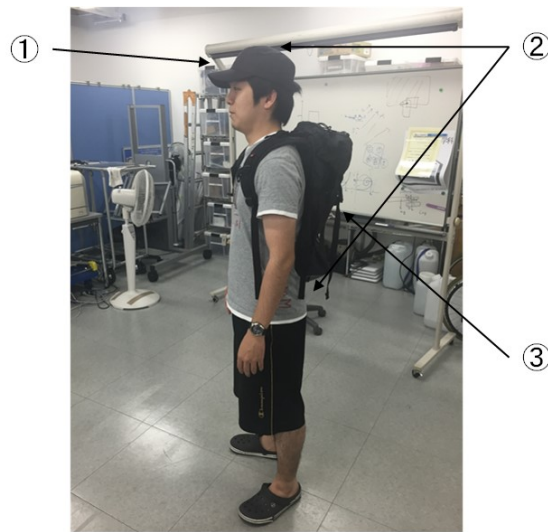


図 3.4.3-2 被験者装備

表 3.4.3-2 計測装置の詳細

図中 番号	名称	機能
①	カメラ	歩行者の視点を記録する
②	IMU (TSND151)	首・身体の向きを計測する
③	PC	IMU のデータを記録する

3.4.4 実験内容

(1) 基本横断特性の取得（実験 1）

図 3.4.4-1 に基本横断特性の取得実験の概要を、表 3.4.4-1 に実験条件を示す。歩行者の基本横断特性を取得するために、接近車両なしの条件で実験参加者に道路を横断させ、歩行速度、道路横断時の首振り確認行動の有無、横断速度、横断角度を取得する。実験は以下の手順で、各実験参加者に対して行った。

- ① 実験参加者に実験内容と手順の説明をする。
- ② 実験参加者に実験に必要な機材（図 3.4.3-2 の実験参加者装備）を取り付ける。
- ③ 実験参加者がスタート位置につき計測機器（図 3.4.3-1 の計測装置）の計測を開始する。
- ④ 歩行開始の合図と共に歩行者がスタートする。
- ⑤ 実験参加者が目的地に到達後、各計測データ（ハイブリッドセンサ、LIDAR 等）を保存する。
- ⑥ 実験 1 の全内容終了後、装置を取り外し、実験を終了する。

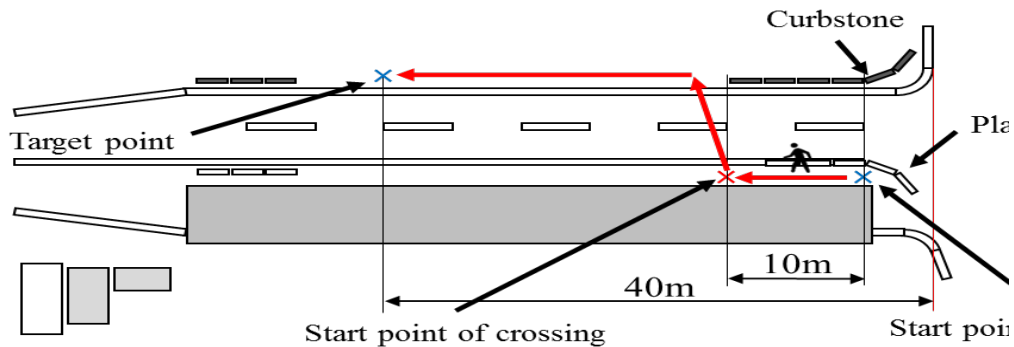


図 3.4.4-1 基本横断特性の取得

表 3.4.4-1 実験条件（基本横断特性の取得）

接近車両	なし
道路横断	あり
実験回数	1回 / 人

(2) 横断に関わる判断基準の取得（実験 2）

図 3.4.4-2 に横断にかかわる判断基準の取得実験の概要を、表 3.4.4-2 に実験条件を示す。横断する・しないに関する判断基準を調査するために、松井らの手法³⁻²³⁾を参考に、車両が接近した場合に実験参加者が横断を断念する位置に車両が到達したタイミングで手元のボタンを押させる。実験は以下の手順で、各実験参加者に対して行った。

- ① 実験参加者に実験内容と手順の説明をする。
- ② 実験参加者に実験に必要な機器（計測ボタン）を持たせる。
- ③ 車両、実験参加者が指定した位置につき計測機器（図 3.4.3-1 の計測装置）の計測を開始する。
- ④ 実験開始の合図と共に車両がスタートする。
- ⑤ 実験参加者が横断を断念する位置に車両が到達したときに手元のボタンを押してもらう。
- ⑥ 車両通過後、各計測データを保存する。
- ⑦ 実験 2 の全内容終了後、計測機器を回収し実験を終了する。

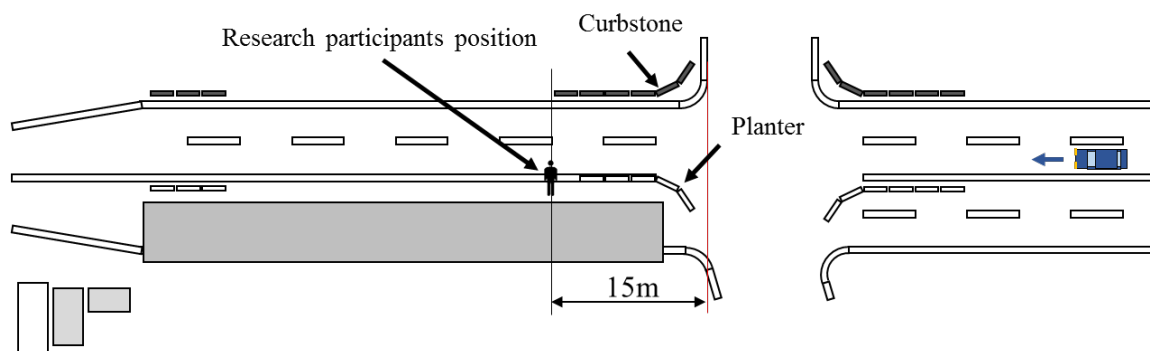


図 3.4.4-2 横断に関わる判断基準の計測

表 3.4.4-2 実験条件（基本横断特性の取得）

接近車両	あり
車両速度	30km/h
道路横断	なし
実験回数	1回 / 人

(3) 車両接近時の横断特性の取得（実験 3）

図 3.4.4-3 に車両接近時の横断特性の取得実験の概要を、表 3.4.4-3 に実験条件を示す。歩行者の車両接近時の横断特性を取得するために、接近車両ありの条件で道路を横断させ、歩行速度、道路横断時の首振り確認行動、横断速度、横断角度を取得する。

また、車両接近時の横断特性の取得（実験 3）では、車両が走行し、歩行者が横断を行うため、車両と歩行者の交錯が生じる可能性があるため、歩行者と車両の間の路上のバリアとして縁石を用いるとともに、車両がバリア前で停止することによって交錯の可能性を除外した。実験は以下の手順で、各実験参加者に対して行った。

- ① 実験参加者に実験内容と手順の説明をする。
- ② 実験参加者に実験に必要な機材（図 3.4.3-2 の実験参加者装備）を取り付ける。
- ③ 車両、実験参加者が指定した位置につき計測機器（図 3.4.3-1 の計測装置）の計測を開始する。
- ④ 実験開始の合図と共に車両がスタートする。
- ⑤ 設定した TTC になるタイミングで歩行開始の合図をし、歩行者が歩行開始位置からスタートする。
- ⑥ 実験参加者が目的地に到達後、各計測データを保存する。
- ⑦ 実験 3 の全内容終了後装置を取り外し、実験を終了する。

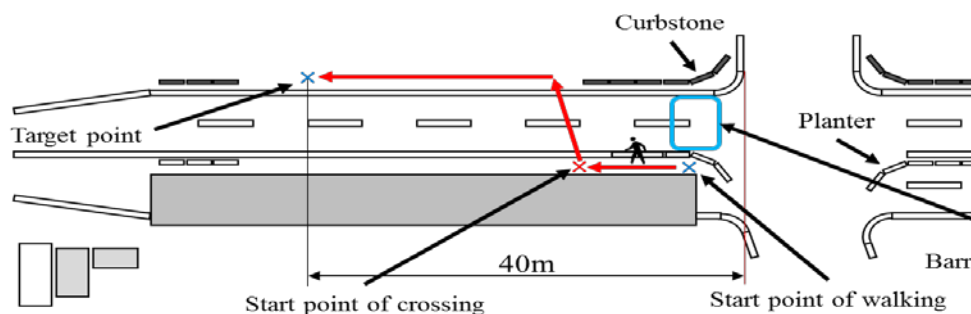


図 3.4.4-3 車両接近時の横断特性の取得

表 3.4.4-3 実験条件（基本横断特性の取得）

接近車両	あり
車両速度	30km/h
TTC	8s
道路横断	あり
実験回数	1回 / 人
路上のバリア	縁石

3.4.5 実験結果

実施した3つの実験で得られた、自由横断速度、横断角度、横断を開始するTTCの閾値、接近車両に対する横断速度の4つのパラメータを集計した結果について示す。

なお、実験1から得られたパラメータが、自由横断速度、横断角度であり、実験2から得られたパラメータが、横断を開始するTTCの閾値であり、実験3から得られたパラメータが、接近車両に対する横断速度である。

(1) 各パラメータの実験結果一覧

属性を考慮しない場合の、各パラメータがとる確率密度をヒストグラムとして図3.4.5-1から図3.4.5-4に示す。赤線は得られたヒストグラムを近似した確率密度関数である。自由横断速度、横断を断念するTTC、接近車両に対する横断速度は正規分布を、横断角度は対数正規分布を近似に用いた。表3.4.5-1は各ヒストグラムの平均と標準偏差をまとめたものである。

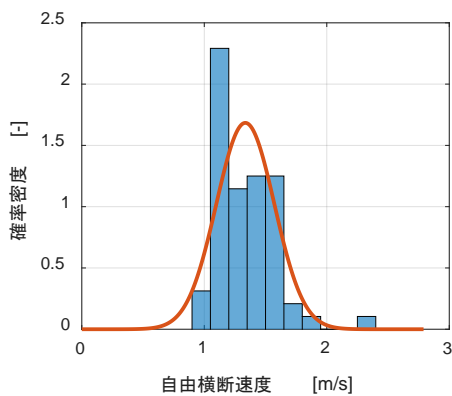


図 3.4.5-1 自由横断速度

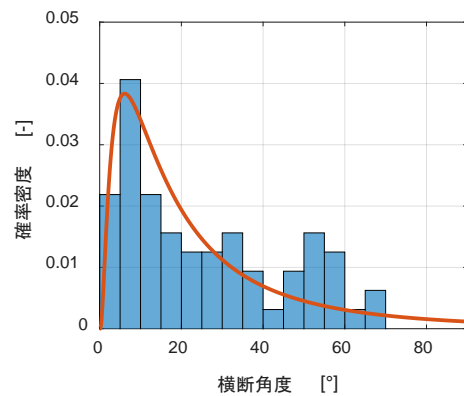


図 3.4.5-2 横断角度

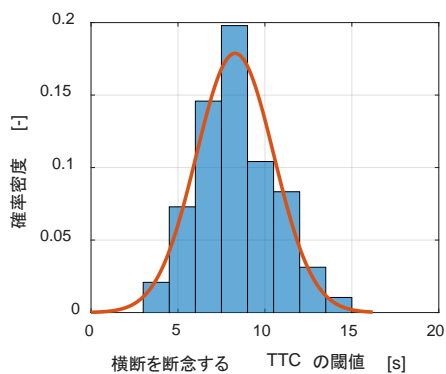


図 3.4.5-3 横断を断念するTTC

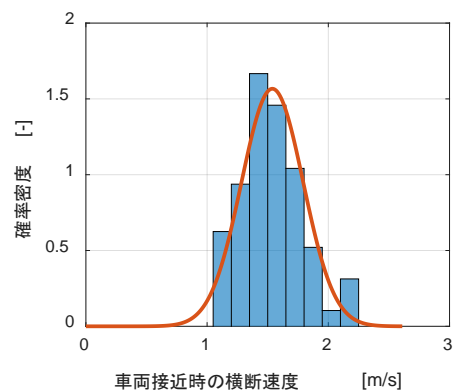


図 3.4.5-4 接近車両に対する横断速度

表 3.4.5-1 各パラメータの平均と標準偏差

	自由横断速度 [m/s]	横断角度 [°]	横断を断念する TTC の閾値 [s]	接近車両に対す る横断速度 [m/s]
平均	1.34	25.61	8.29	1.54
標準偏差	0.24	19.66	2.23	0.25

自由横断速度、接近車両に対する横断速度、歩行速度、接近車両に対する歩行速度に関してはばらつきも小さく、平成 28 年度に実施された定点観測の結果と比較しても大きな違いは見られなかった。横断角度と接近車両に対する横断角度はばらつきが大きく、全体の傾向としては横断角度が 0 から 10[°] 付近の歩行者が多い結果となった。

(2) 各パラメータの年齢別の実験結果一覧

属性別の結果の一例として、年齢別の各パラメータの確率密度をヒストグラムとして図 3.4.5-5 から図 3.4.5-8 に示す。黄線と紫線は各年齢別の得られたヒストグラムの近似曲線である。自由横断速度、横断を断念する TTC、接近車両に対する横断速度は正規分布を、横断角度は対数正規分布を近似に用いた。

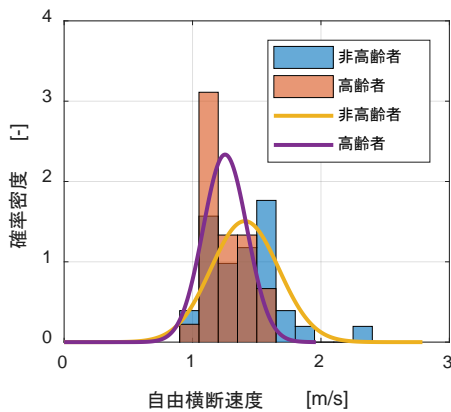


図 3.4.5-5 自由横断速度

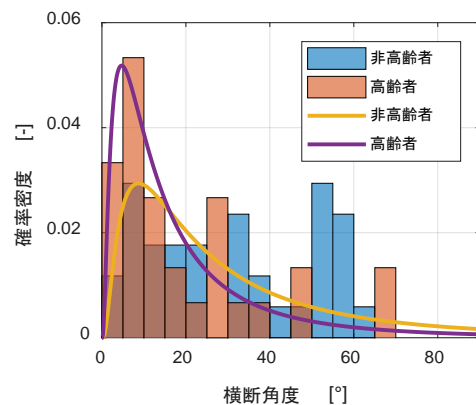


図 3.4.5-6 横断角度

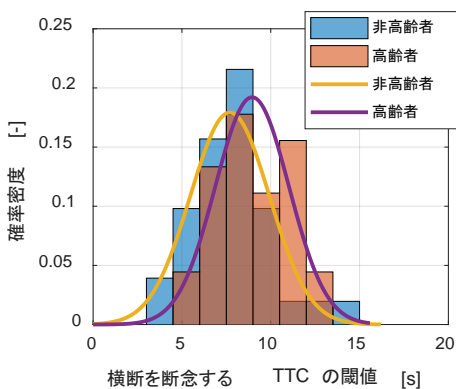


図 3.4.5-7 横断を断念する TTC

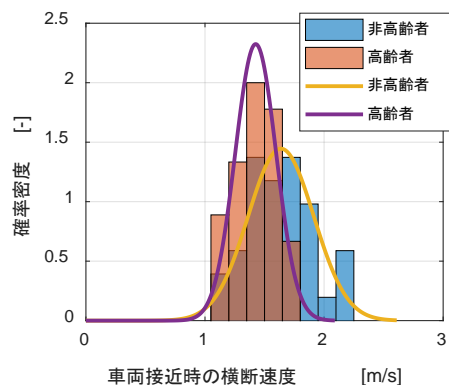


図 3.4.5-8 接近車両に対する横断速度

各ヒストグラムが持つ特性を、非高齢者の場合について表 3.4.5-2 に、高齢者の場合について表 3.4.5-3 にまとめる。

表 3.4.5-2 各パラメータの平均と標準偏差（非高齢者）

	自由横断速度 [m/s]	横断角度 [°]	横断を断念する TTC の閾値 [s]	接近車両に対する 横断速度 [m/s]
平均	1.41	30.87	7.70	1.64
標準偏差	0.26	19.61	2.23	0.28

表 3.4.5-3 各パラメータの平均と標準偏差（高齢者）

	自由横断速度 [m/s]	横断角度 [°]	横断を断念する TTC の閾値 [s]	接近車両に対する 横断速度 [m/s]
平均	1.25	19.65	8.95	1.43
標準偏差	0.17	18.25	2.08	0.17

横断速度と横断角度と車両接近時の横断速度は高齢者よりも非高齢者の方が大きい傾向にあった。また、横断を断念する TTC は非高齢者よりも高齢者の方が大きい傾向にあり、高齢者の方が安全側になる結果となった。自由横断速度と車両接近時の横断速度の標準偏差に着目すると、歩行速度に関する 2 つのパラメータは、高齢者は非高齢者と比較してばらつきが小さい傾向にあることがわかる。

(3) 実験結果の各パラメータ間の相関

自由横断速度、横断角度、横断を開始する TTC の閾値、接近車両に対する横断速度の、4 つのパラメータについて、年齢別の相関を図 3.5.4-9 から図 3.5.4-14 に示す。

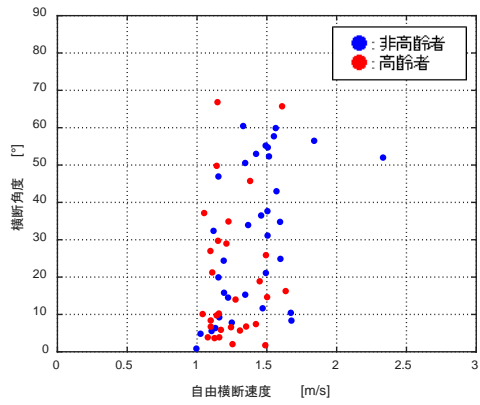


図 3.4.5-9 自由横断速度と横断角度

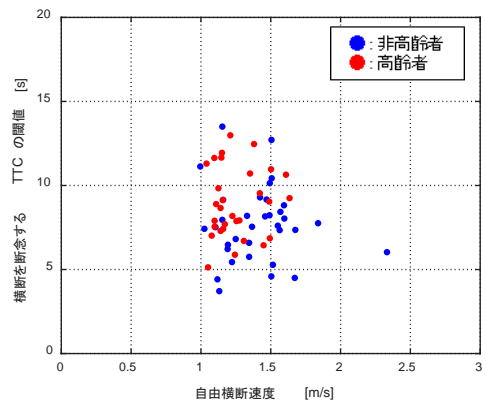


図 3.4.5-10 自由横断速度と横断を断念する TTC の閾値

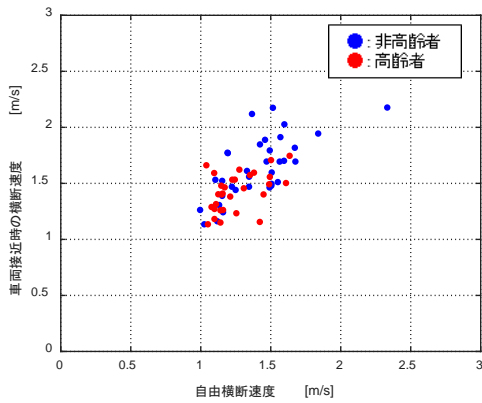


図 3.4.5-11 自由横断速度と車両接近時の横断速度

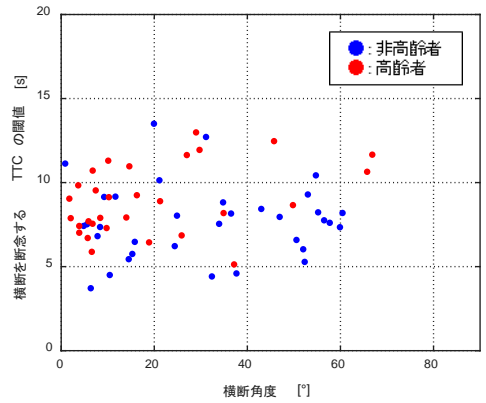


図 3.4.5-12 横断角度と横断を断念する TTC の閾値

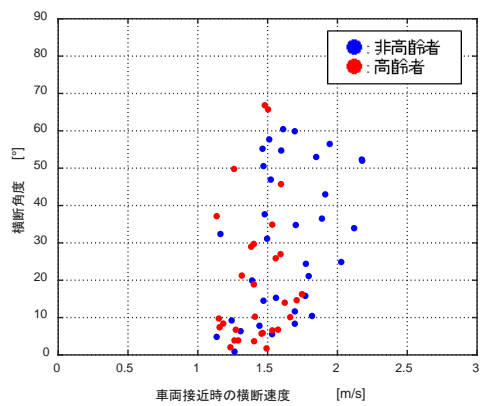


図 3.4.5-13 車両接近時の横断速度と横断角度

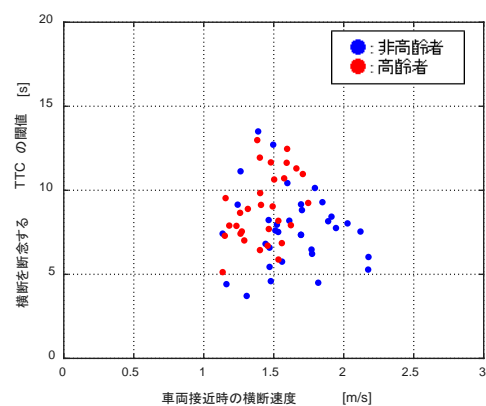


図 3.4.5-14 車両接近時の横断速度と横断を断念する TTC の閾値

(4) 安全確認行動の実験結果

3.4.2 項で示した横断位置より手前で安全確認を開始する確率と道路を横断中に首振り確認を行う確率の一例として、年齢別の実験結果をそれぞれ表 3.4.5-4 と 3.4.5-5 に示す。

表 3.4.5-4 年齢別の横断位置より手前で安全確認した歩行者

	非高齢	高齢	合計
首振り確認あり	12 (30%)	8 (17%)	20 (23%)
首振り確認なし	28 (70%)	40 (83%)	68 (77%)

表 3.4.5-5 年齢別の横断中に首振り確認を行った歩行者

	非高齢	高齢	合計
首振り確認あり	17 (43%)	21 (44%)	38 (43%)
首振り確認なし	23 (57%)	27 (56%)	50 (57%)

横断位置より手前で安全確認を開始する確率に関しては、全体的に横断位置より手前で安全確認をしない傾向にある。年齢別に比較すると、高齢者の方が手前で安全確認をしない傾向にある。道路を横断中に首振り確認を行う確率に関しては、全体的に若干ではあるが道路を横断中に首振り確認をしない傾向にある。年齢別による違いは見られなかった。

3.4.6 歩行者モデルパラメータの決定手法

パラメータ間の相関については、相関性を保ちつつパラメータを決定する手法を確立する。パラメータを決定する手法の候補としては、混合ガウス分布モデルや多変量正規分布モデルなどがある。混合ガウス分布モデルを用いて簡易的に確率密度を算出する場合、峰の数を主観的に決定する必要があるため、今回は実装が容易である多変量正規分布の確率密度関数を用いてパラメータを決定する。式(3.4.6-1)を用い、共分散行列を求め、式(3.4.6-2)の多変量正規分布の確率密度関数を用いることによって各パラメータ間に相関性を持つモデルパラメータを算出する。 \vec{x} は変数ベクトル、 \vec{y} を平均ベクトル、 Σ を共分散行列とする。

$$s_{xy} = \frac{1}{n} \sum_1^n (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y}) \quad \text{式 (3.4.6-1)}$$

$$f(\vec{x}) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}} \sqrt{|\Sigma|}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\vec{x} - \vec{y})^T \Sigma^{-1} (\vec{x} - \vec{y}) \right\} \quad \text{式 (3.4.6-2)}$$

3.4.7 実験結果の年齢別各パラメータ間の確率密度

自由横断速度、横断角度、横断を開始する TTC の閾値、接近車両に対する横断速度の 4 つのパラメータ間の年齢別多変量正規分布の確率密度関数を以下に示す。今回は一例とし

て高齢者の属性について確率密度分布を示す。求めた共分散行列を下記表 3.4.7-1 に示す。平均ベクトルは表 3.4.5-3 各パラメータの平均と標準偏差(高齢者)に示す平均値を用いた。

また、白でプロットしたものが実験結果であり、すべての多変量正規分布の確率密度に対して実験結果と同じような傾向が得られていることが図 3.4.7-1 から図 3.4.7-6 にて確認できた。

表 3.4.7-1 高齢者の各パラメータの共分散行列

	自由横断速度	横断角度	横断を断念する TTC の閾値	接近車両に対する横断速度
自由横断速度	0.03	0.35	0.03	0.01
横断角度	0.35	333.00	14.48	0.39
横断を断念する TTC の閾値	0.03	14.48	4.31	0.15
接近車両に対する横断速度	0.01	0.39	0.15	0.03

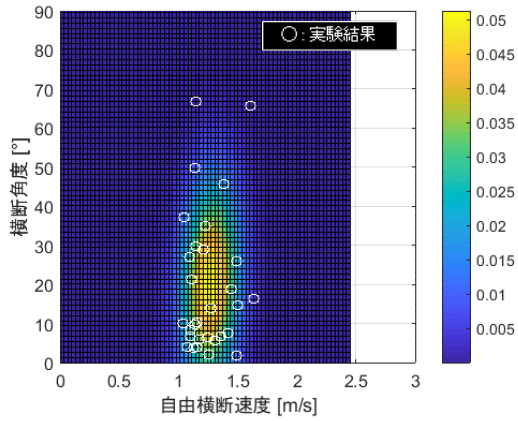


図 3.4.7-1 自由横断速度と横断角度
(高齢者)

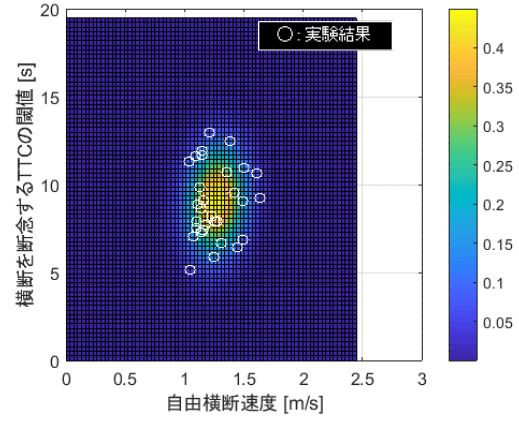


図 3.4.7-2 自由横断速度と横断を断念する
TTC の閾値 (高齢者)

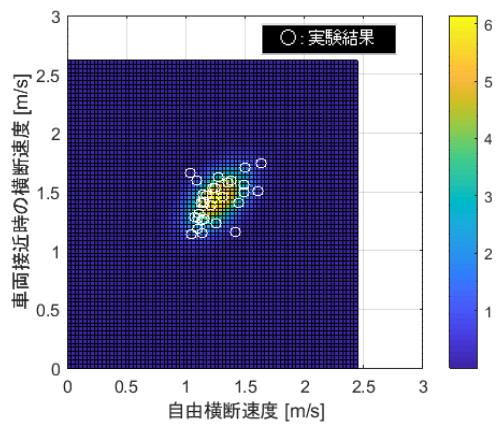


図 3.4.7-3 自由横断速度と車両接近時の横
断速度 (高齢者)

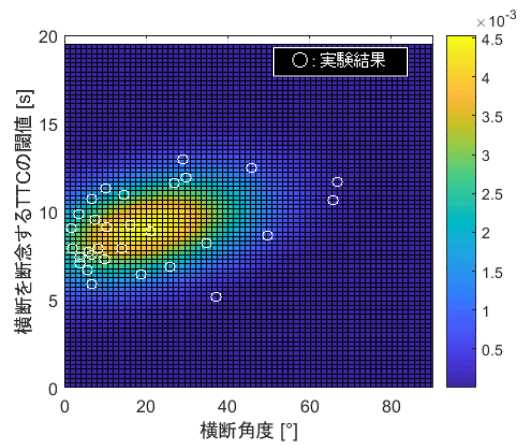


図 3.4.7-4 横断角度と横断を断念する TTC
の閾値 (高齢者)

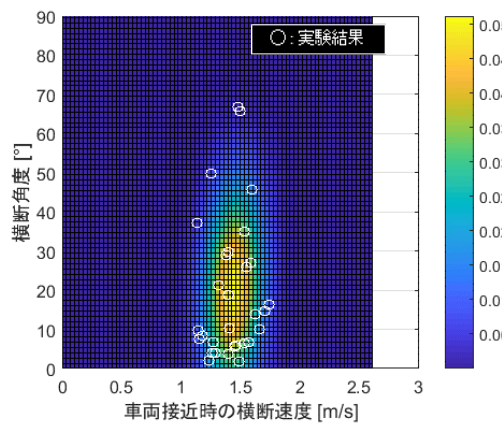


図 3.4.7-5 車両接近時の横断速度と横断
角度 (高齢者)

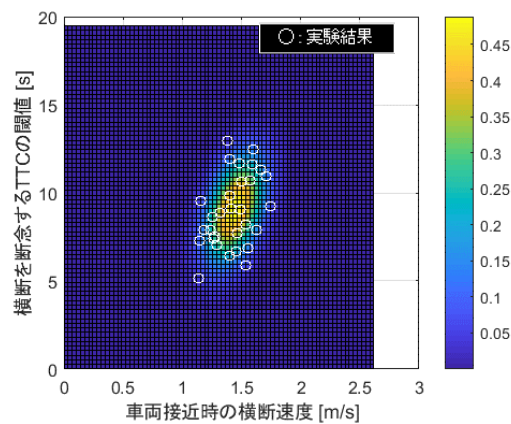


図 3.4.7-6 車両接近時の横断速度と横断
を断念する TTC の閾値 (高齢者)

3.4.8 歩行者モデルパラメータの妥当性の検証

3.4.6 項で示した多変量正規分布による確率密度関数を用いて算出したパラメータをもつ歩行者モデルのパラメータと実験結果を比較し、歩行者の実態に合ったパラメータが設定されているかの検証をする。歩行者エージェントモデルが歩行者の横断行動の実態を再現できているかどうかを確認するため、歩行者エージェントモデルを用いた横断行動のシミュレーションを100件行い、シミュレーション結果から得られた横断速度や横断角度等のパラメータ分布と実験結果から得られた横断速度や横断角度等のパラメータ分布の比較を行った。

今回は一例として高齢歩行者のシミュレーション結果から得られたパラメータ分布と実験結果から得られたパラメータ分布の比較を行った。以下にパラメータ分布の比較を示す。図 3.4.8-1 に高齢者の自由横断速度、図 3.4.8-2 に高齢者の横断角度、図 3.4.8-3 に高齢者の横断を断念する TTC、図 3.4.8-4 に高齢者の車両接近時の横断速度を示す。図 3.4.8-5 に高齢者の自由横断速度と横断角度の関係、図 3.4.8-6 に高齢者の自由横断速度と横断を断念する TTC の閾値の関係、図 3.4.8-7 に高齢者の自由横断速度と車両接近時の横断速度の関係、図 3.4.8-8 に高齢者の横断角度と横断を断念する TTC の閾値の関係、図 3.4.8-9 に高齢者の車両接近時の横断速度と横断角度の関係、図 3.4.8-10 に高齢者の車両接近時の横断速度と横断を断念する TTC の閾値の関係を示す。

以上の結果より、シミュレーション結果は概ね実験結果と一致しており、実態に即した高齢歩行者のパラメータ設定とパラメータの相関を概ね再現できていることが確認できた。

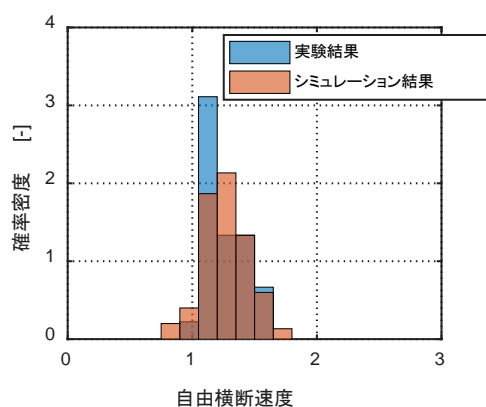


図 3.4.8-1 自由横断速度（高齢者）

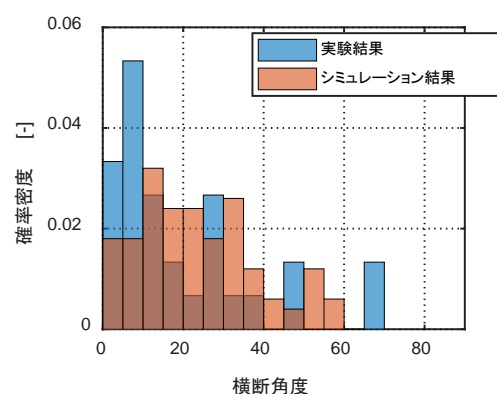


図 3.4.8-2 横断角度（高齢者）

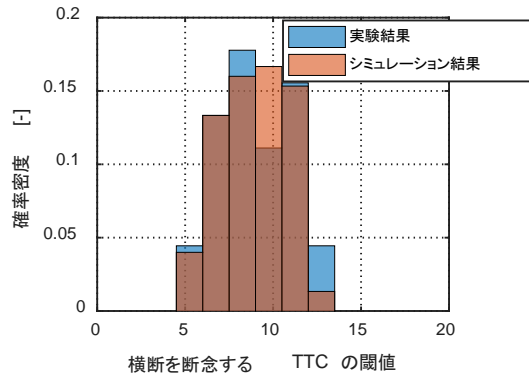


図 3.4.8-3 横断を断念する TTC (高齢者)

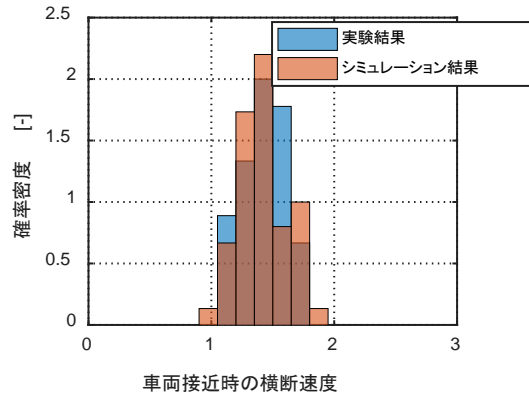


図 3.4.8-4 車両接近時の横断速度 (高齢者)

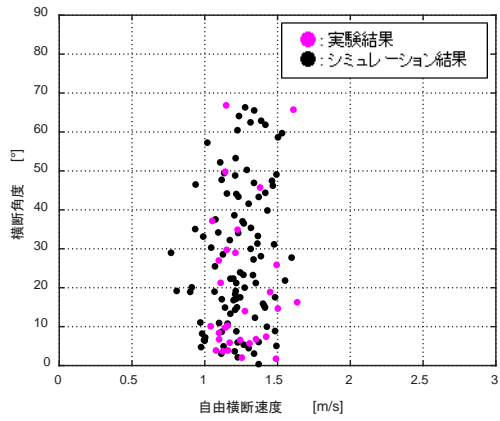


図 3.4.8-5 自由横断速度と横断角度 (高齢者)

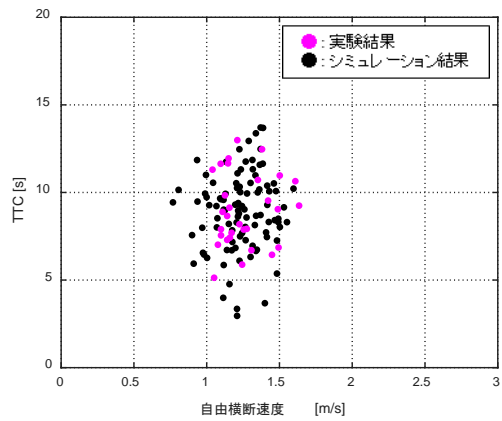


図 3.4.8-6 自由横断速度と横断を断念する TTC の閾値 (高齢者)

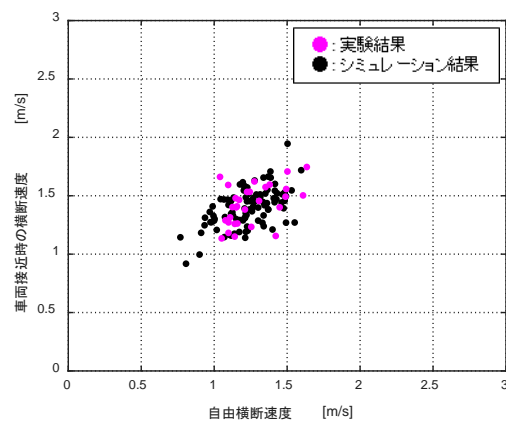


図 3.4.8-7 自由横断速度と車両接近時の横断速度 (高齢者)

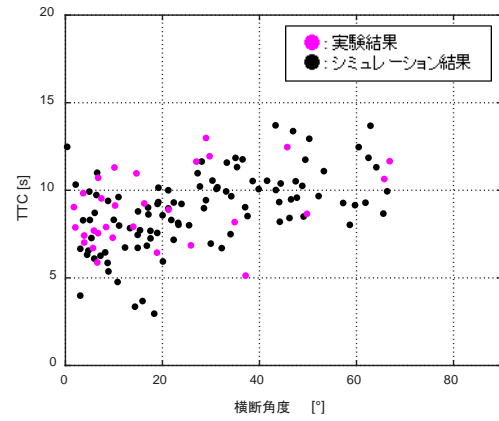


図 3.4.8-8 横断角度と横断を断念する TTC の閾値 (高齢者)

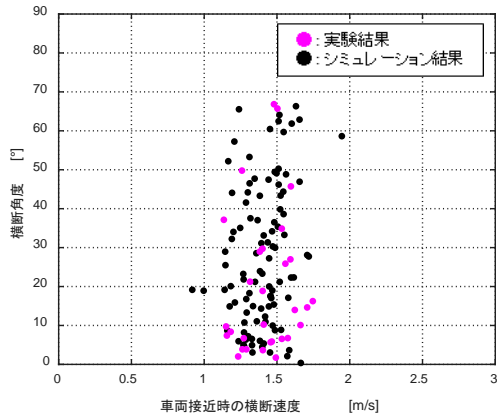


図 3.4.8-9 車両接近時の横断速度と横断角度（高齢者）

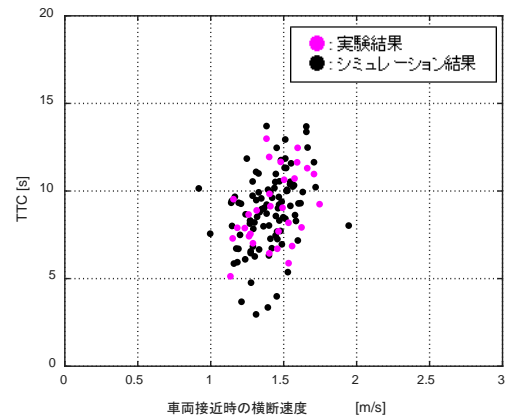


図 3.4.8-10 車両接近時の横断速度と横断を断念する TTC の閾値（高齢者）

3.4.9 歩行者モデルパラメータの検証のまとめ

多変量正規分布による確率密度関数を用いて算出したパラメータをもつ歩行者モデルのパラメータと実験結果を比較し、歩行者の実態に合ったパラメータが設定されているかの確認をした。歩行者エージェントモデルを用いた横断行動のシミュレーションを 100 件行い、シミュレーション結果から得られた横断速度や横断角度等のパラメータ分布と実験結果から得られた横断速度や横断角度等のパラメータ分布の比較を行った。その結果、属性を考慮しない場合、各属性（年齢・性別）を考慮した場合いずれにおいてもシミュレーション結果は概ね実験結果と一致しており、実態に即した歩行者の属性毎のパラメータの違いとパラメータの相関をうまく再現できていることが確認できた。

3.5 まとめ

本章では事故低減効果見積りに資するマルチエージェントシミュレーション開発のため、平成 29 年度に検討したシミュレーションに求められる機能についてまとめた。特にドライバーや歩行者のエージェントが現実にも即した行動を模擬するために求められる観点を整理した。

参考文献

- 3-1) 平松真知子, 小原英郎, 追突事故におけるヒューマンエラー別事故発生シナリオ, 自動車技術会学術講演会前刷集, pp.5-8, 1999
- 3-2) 平松真知子, 小原英郎, 梅崎建城, 出会い頭事故における行動類型別事故発生シナリオ, 自動車技術会学術講演会前刷集, pp.5-8, 2002
- 3-3) 平松真知子, 梅崎建城, 行動分析から見た歩行者横断中の事故発生シナリオ, 字豪奢技術会論文集, Vol.36, No.4, pp.225-229, 2005
- 3-4) 平松真知子, 寸田剛司, 小竹元基, 鎌田実, 一時停止交差点におけるドライバのヒヤリハット・リスク定量化手法の研究, 自動車技術会論文集, Vol.45, No.4, pp.717-722, (2014)
- 3-5) 小島幸夫, 初心運転者と熟練運転者の運転特性 - 第1報: 注視特性について -, 自動車技術会論文集, Vol.28, No.2, pp.73-78, 1997
- 3-6) 小島幸夫, 永井正夫, 初心運転者と熟練運転者の運転特性 - 第2報: カーブ区間での速度制御と方向制御 -, 自動車技術会論文集, Vol.29, No.2, pp.121-126, 1998
- 3-7) 岩城亮, 今長久, 内田信行, 駐車車両陰からの歩行者飛び出しが予想されるシーンにおける運転行動分析 (第1報) -歩行者飛び出し前の運転行動の違いと飛び出し後の回避パフォーマンスの関係性分析 -, 自動車技術会秋季学術講演会講演予稿集, No.2166119, pp.614-619, 2016
- 3-8) 今長久, 岩城亮, 内田信行, 駐車車両陰からの歩行者飛び出しが予想されるシーンにおける運転行動分析 (第2報) -歩行者飛び出し前の運転行動の違いが飛び出し後の回避パフォーマンスに与える影響のモデル化-, 自動車技術会秋季学術講演会講演予稿集, No.2166119, pp.620-625, 2016
- 3-9) 高橋昭夫, ミクロ事故データを活用した四輪車の出会い頭事故の分析, 自動車技術会論文集, Vol.48, No.6, pp.1285-1290, 2017
- 3-10) 大北由紀子, 菅沢深, 毛利宏, ドライブレコーダのデータから解析した脇見運転の特徴, 日本機械学会論文集, vol.83, No.854, DOI: 10.1299/transjsme.17-00085, 2017
- 3-11) 安部原也, 伊藤誠, 山村智弘, 追従運転時における車間時間の違いによる脇見時間への影響と追突警報の効果, 計測自動制御学会論文集, Vol.48, No.11, pp.688-697, 2012
- 3-12) 平松真知子, 寸田剛司, 安部原也, 田川傑, 内田信行, 交差点右折時のドライバのヒヤリハット・リスク定量化手法の研究, 自動車技術会論文集, Vol.45, No.6, pp.1129-1134, 2014
- 3-13) 森田和元, 益子仁一, 岡田竹雄, 脇見運転時のブレーキ操作の遅れに関する考察, 自動車技術会論文集, Vol.33, No.3, pp.161-166, 2002
- 3-14) 森田和元, 田中信壽, 関根道昭, 岡田竹雄, 予防安全支援システム効果評価シミュレータ (ASESS) へのドライバのブレーキ操作モデルの組み込みについて, 自動車技術会論文集, Vol.41, No.2, pp.253-258, 2010
- 3-15) 橋本博, 細川崇, 平松真知子, 新田茂樹, 吉田傑, 高齢運転者の交差点通過時の運転行動実態把握, 自動車技術会論文集, pp.527-532, 2010
- 3-16) 古川弘信, 高齢者にやさしい自動車開発の取り組み, 国際交通安全学会誌, Vol.35, No.3, pp.174-181, 2011
- 3-17) 警察庁, 一定の病気等に係る運転免許制度の在り方に関する有識者検討会, 2012, <http://www.npa.go.jp/bureau/traffic/council/index.html>, (平成30年2月21日閲覧)

- 3-18) 田久保宣晃, 交通事故データによる運転者のヒューマンエラーと心的負荷の一考察, 国際交通安全学会誌, Vol.30, No.3, pp.299-308, 2005
- 3-19) 内田信行, 浅野陽一, 植田俊彦, 飯星明, 携帯電話会話時における運転者の注意状態評価について, 国際交通安全学会誌, Vol.30, No.3, pp.334-341, 2005
- 3-20) 呂彩子, 自動車運転中の急病死, 国際交通安全学会誌, Vol.40, No.1, pp.20-28, 2015
- 3-21) (公財)交通事故総合分析センター, 交通事故統計用語集, <https://www.itarda.or.jp/service/term.php>, (平成30年2月22日閲覧)
- 3-22) 田久保宣晃, 藤岡健彦, 運転中の脇見行動に関する分析, 自動車技術会論文集, Vol.34, No.2, pp.107-112, 2003
- 3-23) 松井靖浩ら, “死傷事故低減に向けた高齢歩行者における行動特性の究明と対策について”, タカタ財団助成研究論文集 2012 (2012)

第4章 開発したシミュレーション技術の実証

本章では、平成29年度に開発した交通環境再現型シミュレーションを用いて事故低減効果を試算し、手動走行や複数の自動走行システムが混在した条件で事故低減効果を比較する機能を確認したことについて述べる。さらに、最終的に全国規模の事故低減効果を推計するために必要なプロセスの提示と、各プロセスにおいて算出した結果の妥当性をどのような手順・方法で確認するのかについて述べる。

4.1 交通環境再現型シミュレーションによる事故低減詳細効果の評価機能の確認

平成29年度は、図4.1-1に示した範囲において交通環境再現型シミュレーションを構築し、数百ものドライバ・歩行者エージェントが同時に行動するとともに、各エージェントによる通常行動と事故要因に関連する行動が複合した状況を再現した。

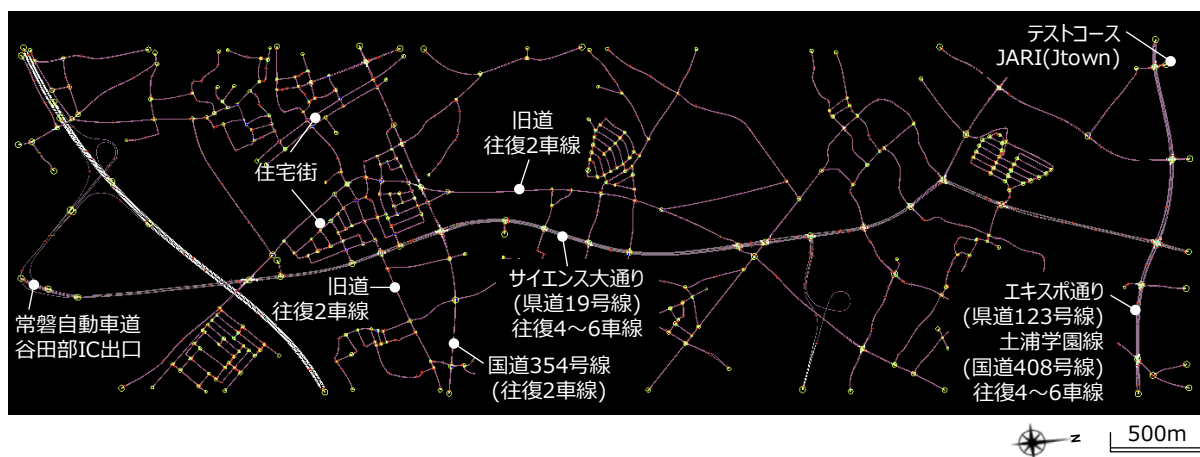


図 4.1-1 シミュレーションの対象範囲

交通環境再現型シミュレーションを用いた事故低減詳細効果の評価機能を確認するため、手動走行と複数の自動走行システムが混在したシナリオを試行的に設定した。今回想定したシステムは、以下の4種類とした。

- ①手動走行（システムなし）：ドライバが認知・判断・操作をすべて自力で実行
- ②衝突被害軽減ブレーキ AEB（Autonomous Emergency Braking）：前方障害物との衝突の危険性が高まった場合に警報と自動的な緊急ブレーキが作動するシステムを搭載
- ③衝突被害軽減ブレーキ（AEB）・車線逸脱警報 LDW（LDW：Lane Departure Warning）：AEBと自車の車線逸脱の可能性が高まった場合に警報が作動するシステムを搭載
- ④自動走行システム：周辺環境認識用のセンサを搭載し、模範的なドライバモデルと同様な判断を行い、操作に移行する際の反応時間を必要としないシステムを搭載

表 4.1-1 は、設定した 4 種類のシステム別の構成率を設定した 6 パターンのシナリオを示している。シナリオ (1) はすべて手動走行の条件、シナリオ (2) は手動走行 50[%]、衝突被害軽減ブレーキ 50[%]の条件、シナリオ (3) は手動走行 25[%]、衝突被害軽減ブレーキ 25[%]、衝突被害軽減ブレーキ・車線逸脱警報 50[%]の条件、シナリオ (4) は手動 25[%]、衝突被害軽減ブレーキ・車線逸脱警報 50[%]、自動走行システム 25[%]の条件、シナリオ (5) は手動走行 25[%]、衝突被害軽減ブレーキ・車線逸脱警報 25[%]、自動走行システム 50[%]の条件、シナリオ (6) は衝突被害軽減ブレーキ・車線逸脱警報 25[%]、自動走行システム 75[%]の条件とした。

手動走行の構成率が低下すること、シナリオ (2) 以降は作動対象が拡大するシステムの構成率が増加すること、シナリオ (4) 以降は自動走行システムの構成率が増加することが事故低減効果にどのように影響するのかを確認することを意図して設定した。

表 4.1-1 シミュレーション実行シナリオ

シナリオ		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
手動走行		100%	50%	25%	25%	25%	
自動走行システム	衝突被害軽減ブレーキ		50%	25%			
	衝突被害軽減ブレーキ + 車線逸脱警報			50%	50%	25%	25%
	自動走行システム				25%	50%	75%

表 4.1-2 は、シナリオ別・システム別の相対事故率・事故件数・事故率を比較した結果である。今回、事故率は事故件数を総走行距離で除した値として定義した。この指標は、車両が 1[km]走行した場合に発生する事故の多さを示している。この値が小さいほど事故の起こりにくい状態を示すため、手動走行 100[%]の事故率である 0.0109[件/km]を 100 とした場合に、各シナリオの全体の事故率がどのように変化するか、また、同じシナリオにおいてシステム別の事故率がどのように異なるのかを比較できる。

全体の事故率をみると、自動走行システムが普及するほど、より高度な自動走行システムになるほど事故率が低いことがわかる。また、システム別の事故率をみると、手動走行、衝突被害軽減ブレーキ (AEB)、衝突被害軽減ブレーキ・車線逸脱警報 (AEB+LDW)、自動走行システムの順に低いことがわかる。

その一方で、手動走行の構成率が徐々に下がっているにも関わらず、全体の事故件数に占める手動走行の車両の構成率が高く、自動走行システム普及後でも手動走行の事故率が明確な低減がみられない傾向を確認した。ただし、この傾向が妥当な結果であるかどうかは現時点では十分に検証できていないため、今後の検討課題といえる。

システム別の相対事故率をみると、手動走行 (100~116)、AEB (41~46)、AEB+LDW (30~36)、自動走行システム (12~16) となっており、自動走行システムを導入することによって手動走行より大幅に事故率を低減する傾向が示されている。

表 4.1-2 シナリオ別・システム別の相対事故率・事故件数・事故率

シナリオ	全体			手動走行			AEB			AEB+LDW			自動走行システム		
	相対事故率 [%]	事故件数 [件]	事故率 [件/km]	相対事故率 [%]	事故件数 [件]	事故率 [件/km]	相対事故率 [%]	事故件数 [件]	事故率 [件/km]	相対事故率 [%]	事故件数 [件]	事故率 [件/km]	相対事故率 [%]	事故件数 [件]	事故率 [件/km]
(1)	100	859	0.0109	100	859	0.0109									
(2)	70	622	0.0076	101	439	0.0111	41	183	0.0045						
(3)	56	474	0.0061	113	210	0.0124	46	99	0.0050	36	165	0.0039			
(4)	46	430	0.0051	116	245	0.0127				30	147	0.0033	14	38	0.0015
(5)	45	393	0.0049	109	247	0.0119				34	79	0.0038	16	67	0.0017
(6)	16	246	0.0018							29	95	0.0031	12	151	0.0013

※相対事故率は手動走行 100%の条件の事故率を 100 としている

図 4.1-2 はシナリオ別の相対事故率、図 4.1-3 はシナリオ別・システム別の相対事故率を示している。前述したように、自動走行システムが普及することで全体の相対事故率が小さくなること、手動走行の事故率は周囲に自動走行システム搭載車両が増加することによって低減しない傾向を示していることがわかる。

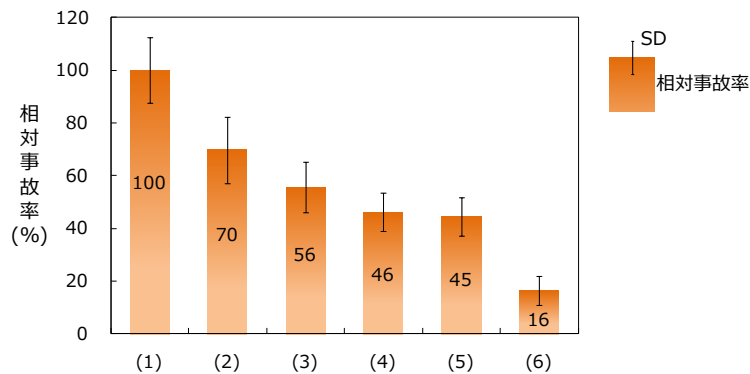


図 4.1-2 シナリオ別の相対事故率の比較

(手動走行 100[%]のシナリオの全体の事故率を 100 とした場合)

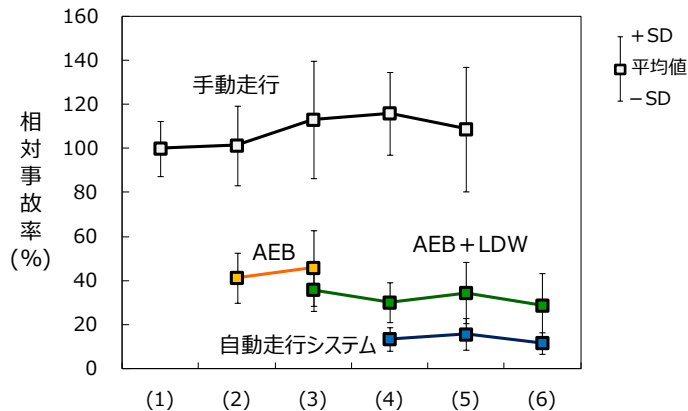


図 4.1-3 シナリオ別・システム別の相対事故率の比較

(手動走行 100[%]のシナリオにおける手動走行の事故率を 100 とした場合)

図 4.1-4 は、シナリオ別・事故類型別の相対事故率・構成率を比較した結果である。シナリオ（1）では追突事故が 58[%]を占めて最多であるが、シナリオ（2）以降は追突事故に有効な自動走行システムを搭載した車両が増加するために、追突事故の構成率が減少することが確認できる。追突事故と同様に、車線逸脱に起因する事故（正面衝突事故・車線逸脱事故）も有効な自動走行システムを搭載した車両が増加するとともに事故率・構成率が減少する傾向を示している。

その一方で、出会い頭事故や歩行者横断事故のように、衝突相手が車両前方に出現した段階で衝突までの余裕が比較的小さい事故は、自動走行システムが普及したシナリオであっても発生する事故のなかで構成率が高い傾向が確認できる。このように、自動走行システムを搭載することで有効な事故と依然として課題となる事故に峻別することができる。

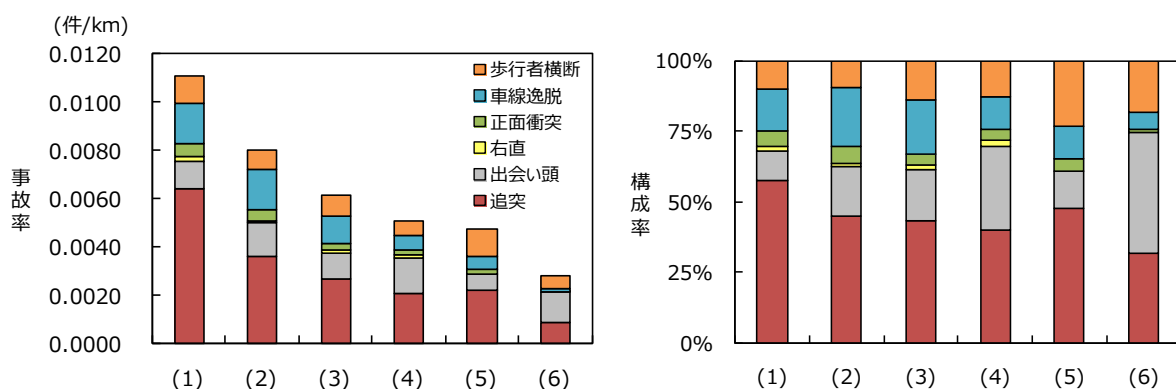


図 4.1-4 シナリオ別・事故類型別の相対事故率・構成率の比較

図 4.1-5 はシナリオ（1）で発生した事故の事故類型別の発生地点、図 4.1-6 はシナリオ（3）で発生した事故の事故類型別の発生地点、図 4.1-7 はシナリオ（6）で発生した事故の事故類型別の発生地点を示している。

シナリオ（1）では全体で 859 件の事故が発生し、追突事故 494 件、交差点事故（出会い頭事故、右折事故）104 件、車線逸脱事故 128 件、正面衝突事故 45 件、歩行者横断事故 88 件が発生した。交通量の多い幹線道路沿いに追突事故が多く発生し、幹線道路に比べると交通量の少ない旧道沿いで正面衝突事故や車線逸脱事故が発生している。

シナリオ（3）では全体で 474 件の事故が発生し、追突事故 205 件、交差点事故（出会い頭事故、右折事故）95 件、車線逸脱事故 89 件、正面衝突事故 18 件、歩行者横断事故 67 件が発生した。シナリオ（1）に比べて事故が全体的に減少しており、とくにシステムが有効な事故類型である追突事故、車線逸脱事故、正面衝突事故が減少している。

シナリオ（6）では全体で 246 件の事故が発生し、追突事故 78 件、交差点事故（出会い頭事故、右折事故）106 件、車線逸脱事故 15 件、正面衝突事故 2 件、歩行者横断事故 45 件が発生した。シナリオ（3）に比べてさらに事故が全体的に減少している。

このように、平成 29 年度に開発した交通環境再現型シミュレーションを活用することによって、発生した全体の事故件数だけでなく、事故類型別の事故件数や発生地点の観点で事故の発生状況の詳細な比較が可能になることを確認した。

(1)シミュレーション(手動走行100%)

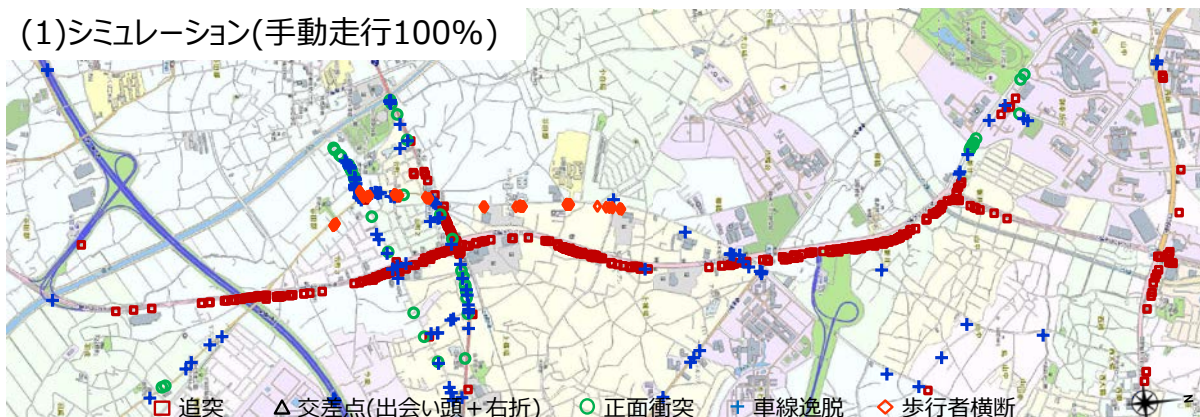


図 4.1-5 シナリオ 1 における事故類型別の発生地点 (n=859)

(3)シミュレーション(手動走行25%, AEB25%, AEB+LDW50%)

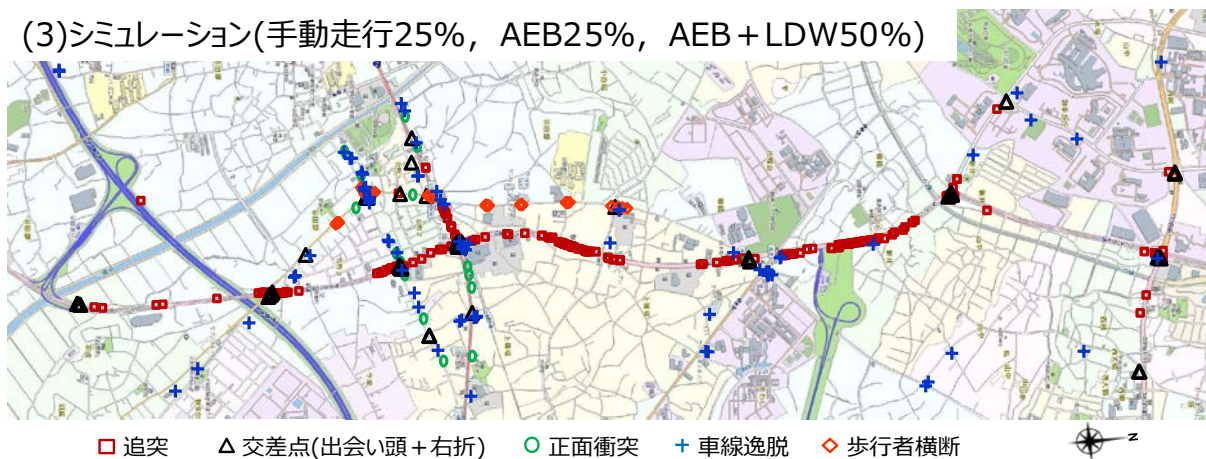


図 4.1-6 シナリオ 3 における事故類型別の発生地点 (n=474)

(6)シミュレーション(AEB+LDW25%, 自動75%)

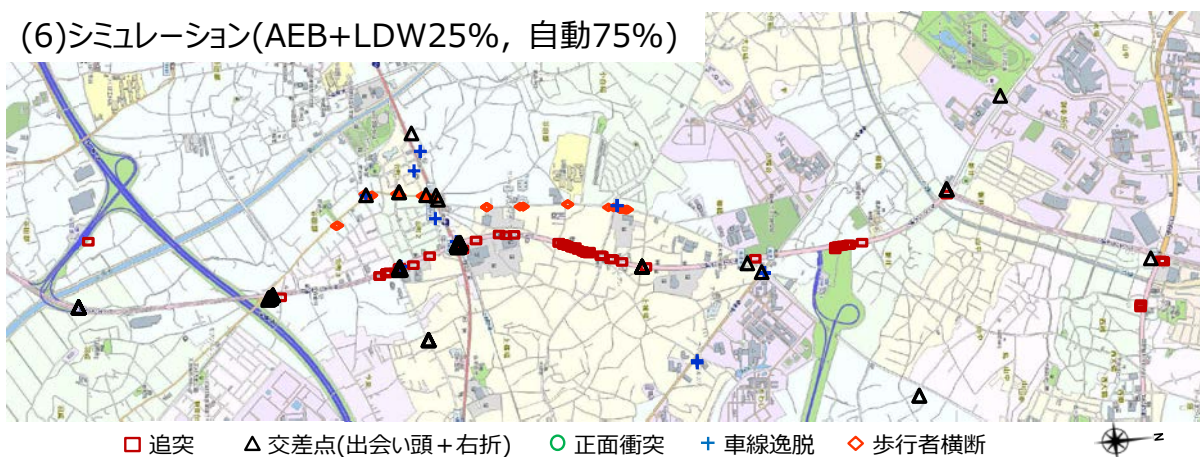


図 4.1-7 シナリオ 6 における事故類型別の発生地点 (n=246)

本事業のシミュレーションが目指す最終的なアウトプットは、自動走行システムが交通事故死者数低減の定量的な見積もり結果であるため、シナリオ別に得られた結果に基づいて死者数に換算する必要がある。今回は試行的に事故の衝突条件（相対速度）と、交通事故統計の危険認知速度別の致死率を乗じることで死者数に換算した。

図 4.1-8 は、シナリオ（1）、（3）、（6）の車両単独事故・正面衝突事故における死者数低減効果を推定した例を示している。自動走行システムの普及拡大・高度化が進むほど事故件数が減少するだけでなく、衝突速度が低減していることがわかる。その結果として、推定された死者数もシナリオ（1）では13名であったが、シナリオ（3）では8名、シナリオ（6）では2名に減少している。このように、交通環境再現型シミュレーションによって発生した事故の衝突条件に基づいて乗員の損傷程度を推定できることがわかった。なお、最終的な傷害評価モジュールには、乗員だけではなく、歩行者や自転車乗員の傷害を定量的に評価できるロジックを採用する予定である。

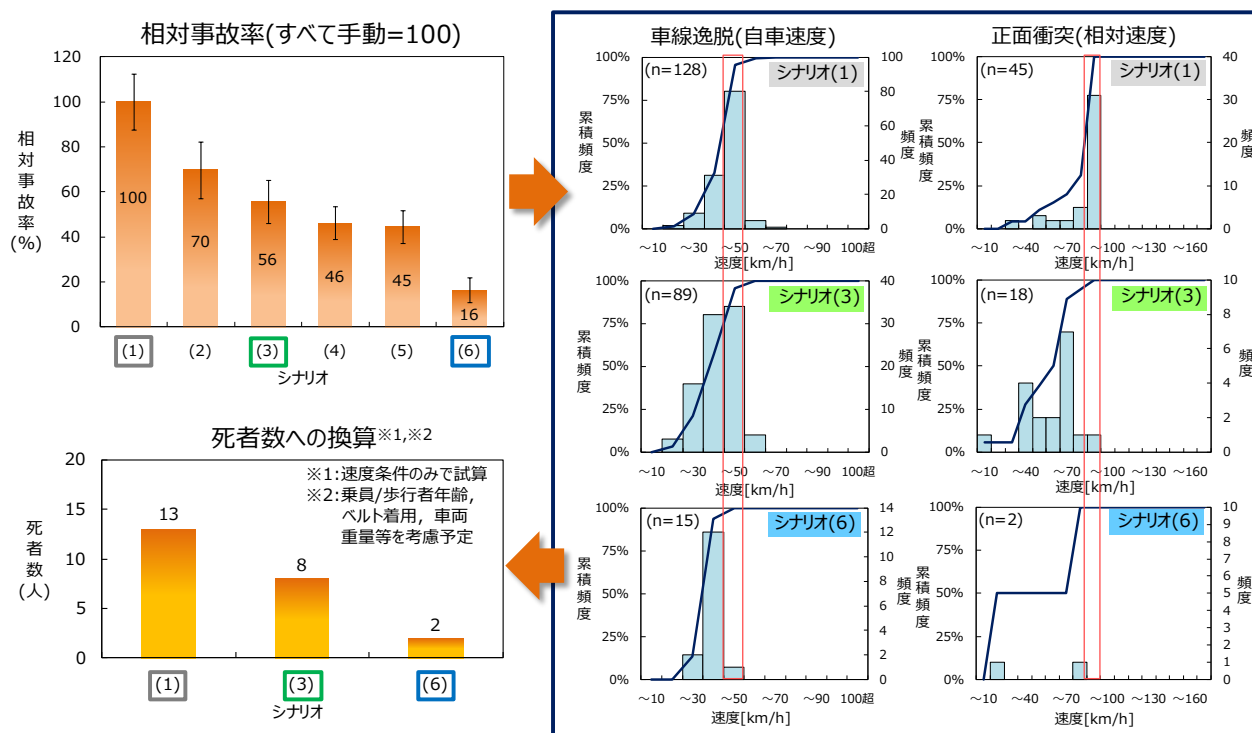


図 4.1-8 車両単独事故・正面衝突事故における死者数低減効果の推定例
 (シナリオ(1)、(3)、(6))

4.2 シミュレーション技術の妥当性の確認

自動走行システムがもたらす効果に関する単純な評価方法は、図 4.2-1 に示すようなシステムがない場合とある場合で同じシナリオを比較し、式 4.2-1 で定義される指標によって低減効果の評価することである。本事業で開発するシミュレーション技術を活用することによって、従来の事故件数の低減や衝突速度の低減といった個別の効果の評価にとどまらず多角的な視点で効果を総合的に評価できる可能性がある。このような評価を実施するためには、妥当性を有したシミュレーション技術を開発できたかどうかを実証するためのプロセスが不可欠である。本事業のシミュレーション技術の検証対象となる妥当性とは、最終的な効果評価の結果が事故実態に整合する結果を示しているのかだけでなく、交通参加者（ドライバ、歩行者など）の行動をどのような概念・データ・手法に基づいてモデル化したのか、モデル化したものが現実の行動を模擬しているのかなどをそれぞれ検証することが求められる。そのためには本事業で開発したシミュレーション技術の実証に関するプロセスを明確にして、開発状況に応じて実施するべき検証を取り組んでいくことが重要である。

そこで、本節では、本事業のシミュレーションが評価する対象となる交通事故低減詳細効果を選定・定義し、効果を適正に評価するための効果評価モジュールの要件を整理する。さらに、シミュレーション技術を活用して得られる評価結果に関する妥当性を検証するための全体的な構想をまとめる。

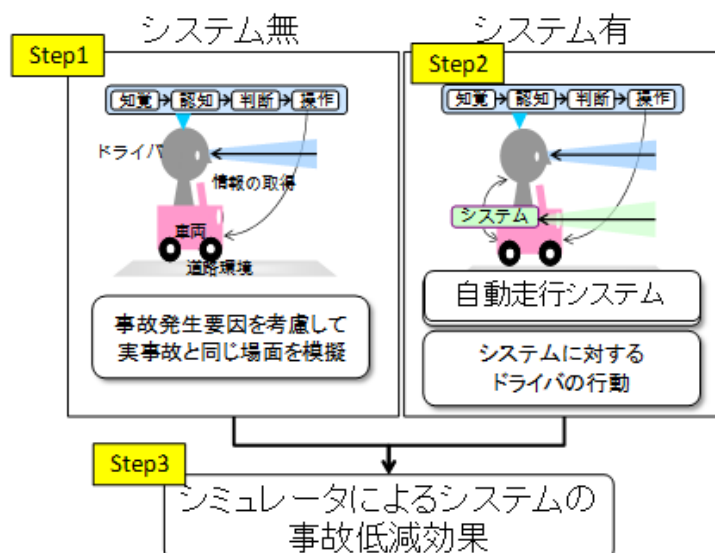


図 4.2-1 効果評価の考え方⁴⁻¹⁾

$$E = 1 - \frac{N_w}{N_{wo}} \quad \text{式 4.2-1}$$

本事業で開発するシミュレーション技術の活用によって、従来よりも多角的な視点で交通事故低減詳細効果を評価できる可能性がある。ただし、本格的な活用をする前に、開発したシミュレーション技術に関する妥当性を確認するプロセスが不可欠である。本事業のシミュレーション技術の妥当性として検証すべき対象は、最終的な効果評価の結果だけでなく、以下に示すように交通参加者のモデル化の妥当性、事故シナリオの設定の妥当性、評価対象となるシステムの設定の妥当性、効果評価用のデータ・ロジックの妥当性などが必要である。

【妥当性を検証する視点】

①交通参加者のモデル化

- ・対象となる事故場面における交通参加者の通常時から緊急時までの行動がモデル化されているか。
- ・モデル化されたものによって現実的な交通参加者の行動が表現されているか。
- ・自動走行システムに対するドライバの反応特性が表現されているか。

②事故シナリオの設定

- ・損傷程度別（死亡事故・重傷事故・軽傷事故）の事故実態が反映されているか。
- ・対象となる事故場面におけるドライバの人的要因などが反映されているか。

③システムあり

- ・評価対象となる自動走行システムの作動原理が表現できる仕組みになっているか。
- ・自動走行システムの作動内容が正確に表現されているか。

④効果評価

- ・乗員や歩行者の傷害、事故渋滞が発生する可能性などを定量的に評価するための適正なロジックを採用しているか。

⑤評価結果

- ・①・②・③・④の妥当性がそれぞれ検証されているか。
- ・参照すべき公知の結果（交通事故統計データ分析にもとづく評価結果^{4.2)}、J-NCAPの予防安全性能の評価結果^{4.3)}など）と対比されているか。

4.2.1 交通参加者の行動モデルの検証

本事業で開発するシミュレーションでは、認知・判断・操作（行動）をそれぞれのエージェントが独自に実行する行動モデルを構築している^{4.4)}。平成27年度、平成28年度の開発によって、ドライバと歩行者の行動モデルが構築されている。また、現実のドライバや歩行者の行動は一様ではなく、個々で異なる行動をとる側面があるため、ドライバや歩行

者の年齢・性別・性格を考慮するパラメータを検討し、交通行動に個人差の影響が生じるような枠組みを採用している^{4,5)}。これによって、ドライバや歩行者が現実的な行動を模擬すること、ドライバや歩行者の行動における個人差を模擬することが可能になっている。

従って、行動モデルに関する検証する対象は、シミュレーションに登場させるドライバや歩行者の属性をいかに現実的なものにできるのか、ドライバや歩行者の比率や密度をいかに現実的なものにできるのかということである。

図 4.2.1-1 は、平成 22 年のつくば市における年齢別・男女別の人口の比率を示している。また、図 4.2.1-2 は、平成 25 年の茨城県における年齢別・男女別の運転免許保有者の比率を示している。このように、シミュレーションで登場するドライバや歩行者については、参照できる統計データに基づいて現実的な設定をすることが重要である。

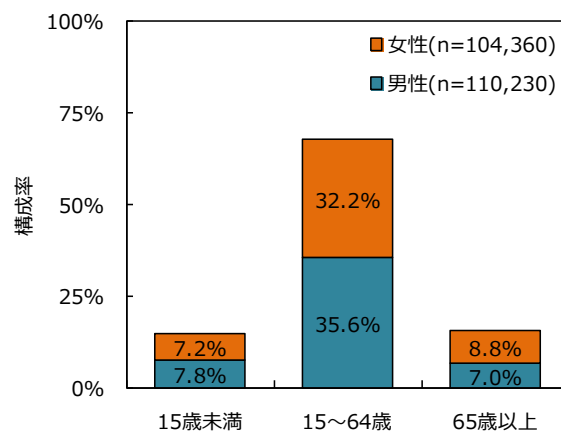


図 4.2.1-1 つくば市における年齢別・男女別の人口の比率（平成 22 年国勢調査）

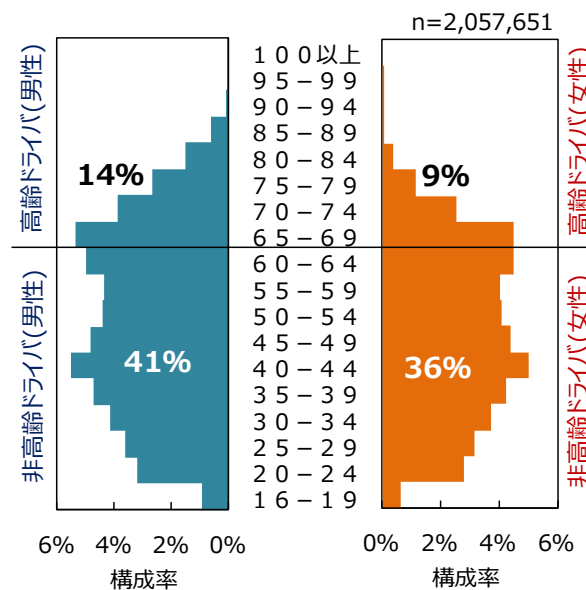


図 4.2.1-2 茨城県における年齢別・男女別の運転免許保有率（平成 25 年運転免許統計）

図 4.2.1-3 は、つくば市が平成 25 年に公表した代表交通手段別出発時間帯トリップ数を示している⁴⁻⁶。この結果から、つくば市における日内の代表交通手段別の交通量の内訳や変動について具体的に把握できる。つくば市において全体の交通行動がピークになるのは 7～8 時台と 17～18 時台であることがわかる。交通手段別にみると、自動車については全体と同様を示している一方で、徒歩や自転車による交通量は 7～18 時台に比べると、それ以外の時間帯は少なくなるように、全体とはやや異なる特徴を示している。

シミュレーションで日内の交通量の変動を模擬するような場合は、この調査結果が示すような実態に基づいて設定する必要がある。

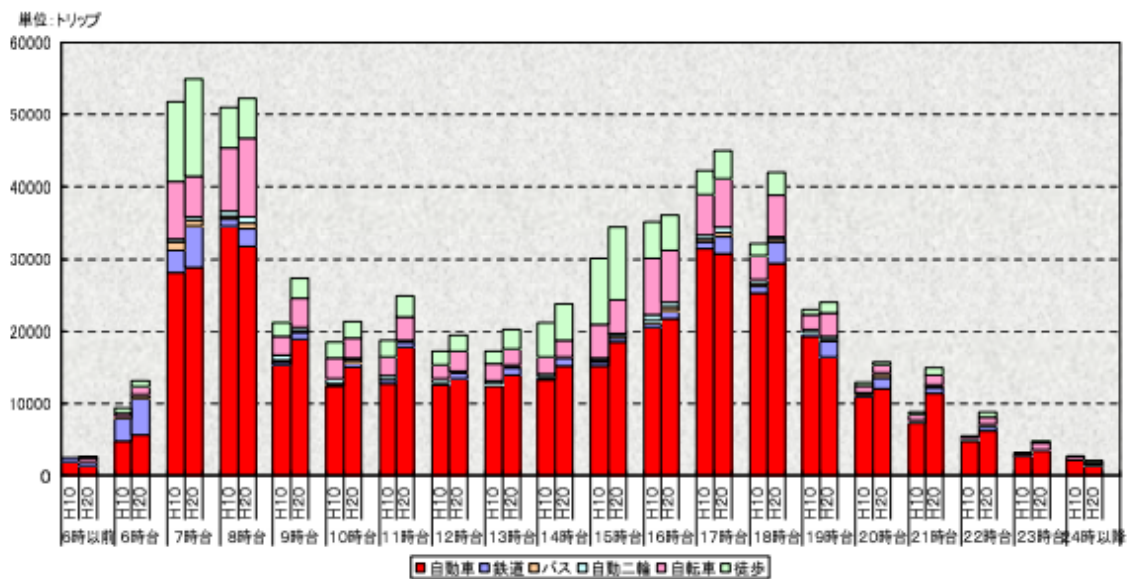


図 4.2.1-3 代表交通手段別出発時間帯トリップ数（つくば市発）

（注）各年「東京都市圏パーソントリップ調査」に基づき作成

4.2.2 事故シナリオの検証

シミュレーションにおいて交通事故の発生を模擬するためには、ドライバ・歩行者の行動モデルの枠組みを活用して事故要因に関係する行動をいかに模擬できるかが重要な課題である。

自動走行システムによって交通事故死者数を低減する効果を算出することが本事業の目的であるため、死者数の多い事故類型を優先して再現する必要がある。平成 25 年の交通事故統計にもとづくと、歩行者横断事故 (934 件)、車線逸脱事故 (621 件)、出会い頭事故 (364 件)、正面衝突事故 (357 件)、追突 (171 件) が対象といえる。

図 4.2.2-1 は、これらの事故類型の死亡事故におけるドライバの人的要因の構成率を示している。ドライバの人的要因のうち主な人的要因としては、漫然運転等 (追突 49[%]、車線逸脱 18[%]、歩行者横断中 28[%]、正面衝突 34[%]、出会い頭 16[%])、脇見運転等 (追突 35[%]、車線逸脱 8[%]、歩行者横断中 33[%]、正面衝突 13[%]、出会い頭 11[%])、安

全不確認（追突 2[%]、車線逸脱 3[%]、歩行者横断中 29[%]、正面衝突 5[%]、出会い頭 54[%]）、操作不適（追突 2[%]、車線逸脱 52[%]、歩行者横断中 1[%]、正面衝突 19[%]、出会い頭 4[%]）が挙げられる。

ドライバの知覚・認知に関する人的要因である「漫然運転等」、「脇見運転等」、「安全不確認」、操作に関する人的要因である「操作不適」の4つの要因の模擬方法を具体化することによって、対象となる5つの事故類型の71~90[%]をカバーできると考えられる。

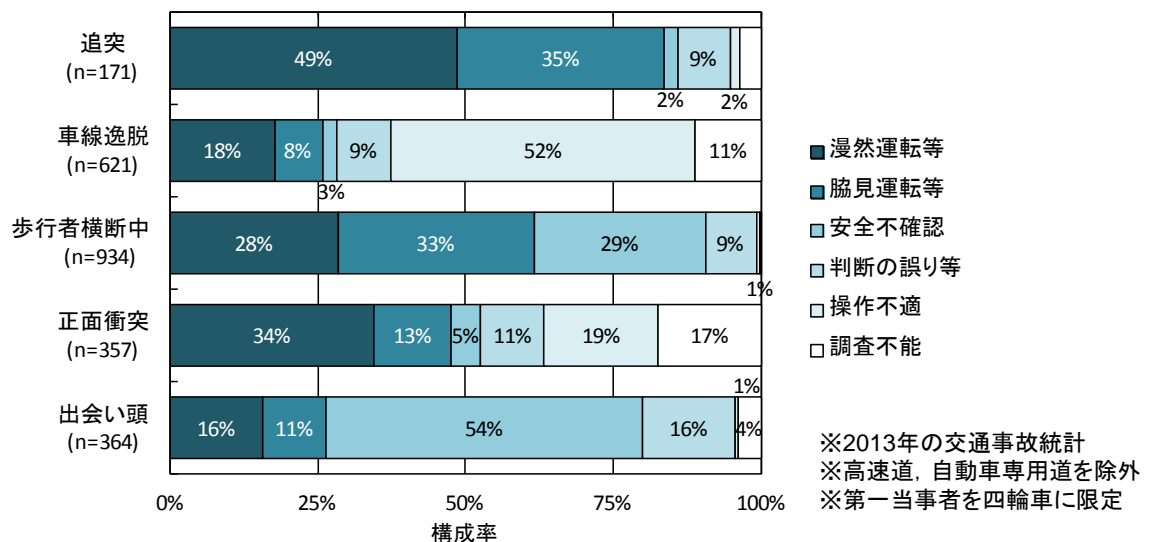


図 4.2.2-1 事故類型別の死亡事故におけるドライバの人的要因の構成率（平成 25 年）

主要なドライバの人的要因を特定した一方で、これらの人的要因は道路形状や昼夜といった環境や状況に関係なく一様に発生しているとは考えられない。そこで、対象とする人的要因はどのような環境や状況で発生しやすい特徴があるのか把握する必要がある。

図 4.2.2-2 は、ドライバの漫然運転等・脇見運転等によって発生した追突事故における地形別・昼夜別・道路形状別の死亡事故件数である。地形別は市街地^{※1}・非市街地^{※2}、昼夜別は昼・夜、道路形状別は信号交差点・無信号交差点・カーブ単路・直線単路・その他という条件で分類を行った。

漫然運転等・脇見運転等のどちらも追突事故の死亡事故は夜間の直線単路と交差点付近が多いこと、昼夜ともに非市街地の方が多いたことがわかる。一般的に追突事故は昼間に発生することが多いが、死亡事故の場合は夜間に発生するという点で事故の起こりやすさとは異なる特徴がある。

※1 市街地：道路に沿っておおむね 500 [m]以上にわたって、住宅、事業所または工場等の建造物が連立し、またはこれらが混在して連立している状態であって、その地域における建造物および敷地の占める割合が 80 [%]以上になるいわゆる市街地的形態をなしている地域

※2 非市街地：市街地以外の地域

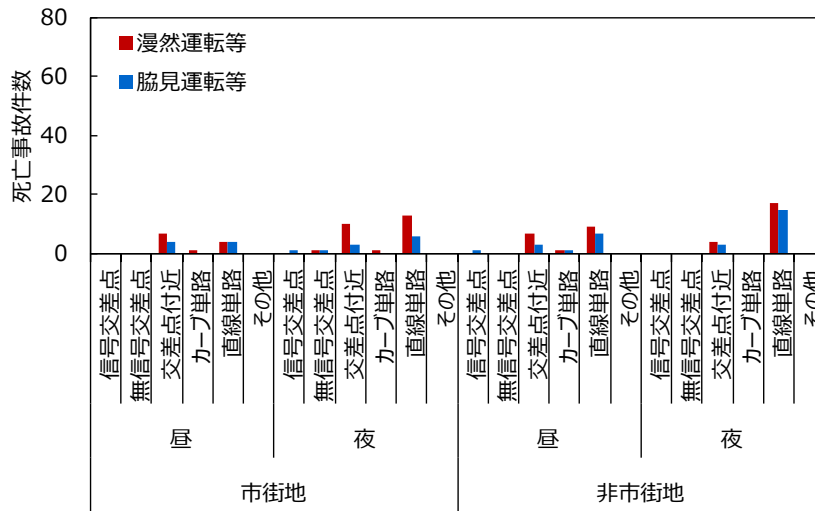


図 4.2.2-2 追突事故における地形別・昼夜別・道路形状別の死亡事故件数 (第1当事者の運転者の漫然運転等、脇見運転等) (平成25年)

図 4.2.2-3 は、ドライバの脇見運転等・漫然運転等によって発生した歩行者横断事故における地形別・昼夜別・道路形状別の死亡事故件数である。追突事故よりもさらに夜間で発生する死亡事故が多いこと、追突事故に比べると市街地で発生する死亡事故が多いことがわかる。道路形状別にみると、夜間の市街地の直線単路・交差点付近・無信号交差点、夜間の非市街地の直線単路で発生する死亡事故が多いことがわかる。

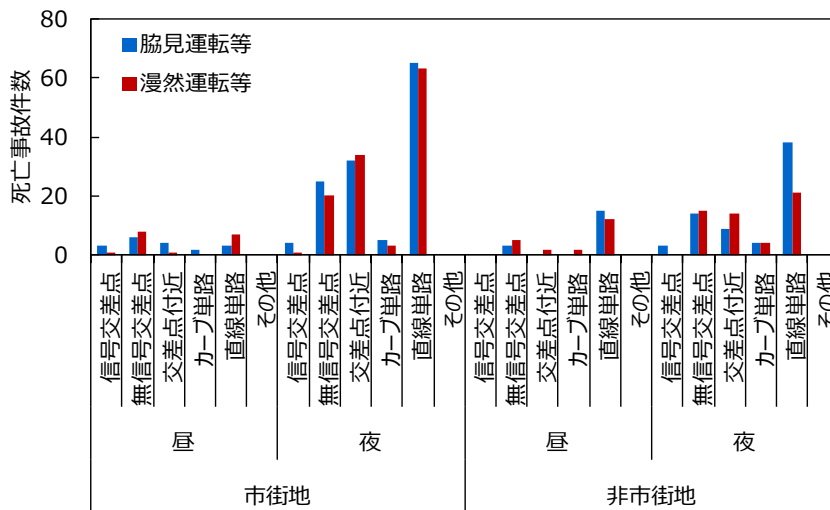


図 4.2.2-3 歩行者横断事故における地形別・昼夜別・道路形状別の死亡事故件数 (第1当事者の運転者の脇見運転等、漫然運転等) (平成25年)

図 4.2.2-4 は、ドライバの安全不確認・漫然運転等によって発生した出会い頭事故における地形別・昼夜別・道路形状別の死亡事故件数である。追突事故・歩行者横断事故と異なり、昼間に発生する死亡事故が多いことがわかる。市街地・非市街地ともに昼間の無信号交差点で発生する死亡事故が多く、全体的に安全不確認が多いことがわかる。

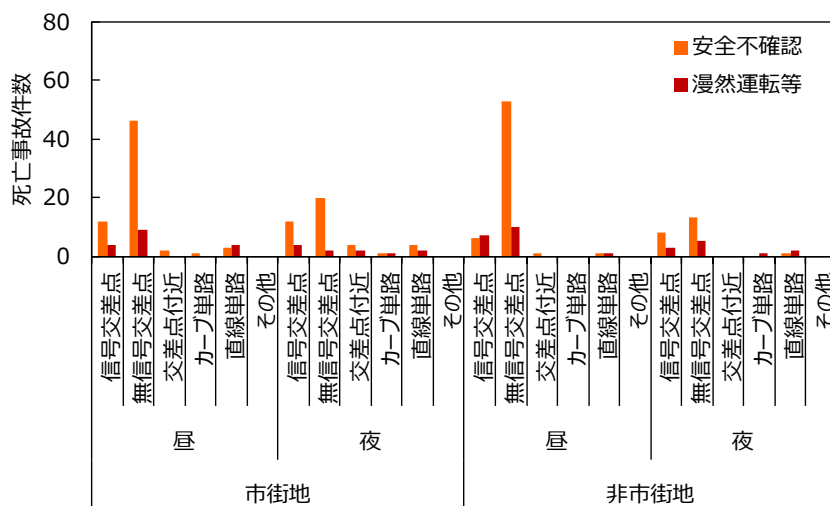


図 4.2.2-4 出会い頭事故における地形別・昼夜別・道路形状別の死亡事故件数
(第 1 当事者の運転者の安全不確認、漫然運転等、判断の誤り等) (平成 25 年)

図 4.2.2-5 は、ドライバの操作不適・漫然運転等によって発生した正面衝突事故における地形別・昼夜別・道路形状別の死亡事故件数である。昼間の非市街地で発生する死亡事故が多いこと、直線単路・カーブ単路で発生することが多いことがわかる。人的要因としては、操作不適より漫然運転等が要因となる死亡事故が多い。

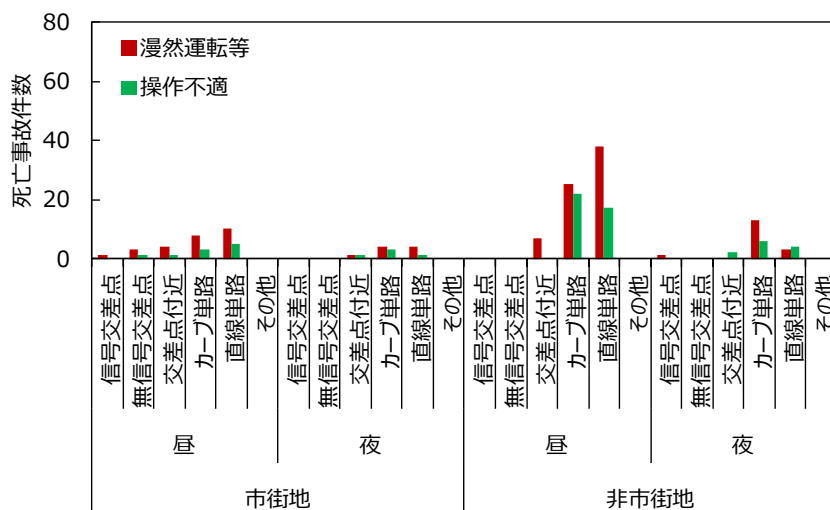


図 4.2.2-5 正面衝突事故における地形別・昼夜別・道路形状別の死亡事故件数
(第 1 当事者の運転者の操作不適、漫然運転等) (平成 25 年)

図 4.2.2-6 は、ドライバの漫然運転等によって発生した歩行者横断事故における地形別・昼夜別・道路形状別の死亡事故件数を示している。昼間の非市街地で発生する死亡事故が多く、とくにカーブ単路・直線単路で多いことがわかる。

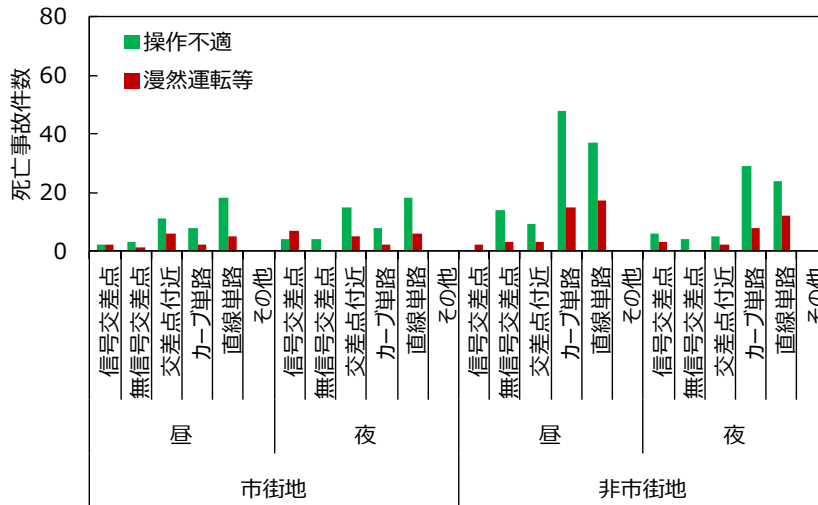


図 4.2.2-6 車線逸脱事故における地形別・昼夜別・道路形状別の死亡事故件数 (操作不適、漫然運転等) (平成 25 年)

このように、シミュレーションの対象とした事故類型の死亡事故においてドライバの人的要因はどのような要因であるのか、人的要因はどのような環境・状況で発生しやすいのかの特徴を把握した上で再現することが重要である。

4.2.3 システム作動特性の定義方法の検証

(1) 緊急時に作動する自動走行システム

自動走行システムの普及・高度化に伴う事故低減効果を正確に見積もるためには、評価対象となる自動走行システムの作動特性を定義するためのパラメータと設定を正確に実施することが前提となる。

自動運転レベル 1 のようにドライバの監視が前提であり、かつ、主に緊急時に作動するような自動走行システム (衝突被害軽減ブレーキなど) は、障害物との相対距離と相対速度によって定義される衝突余裕時間 (TTC : Time to Collision) ⁴⁻⁷⁾によって警報の作動と自動ブレーキの作動タイミングを決定することが一般的である。図 4.2.3-1 は、今回のシミュレーションで設定した衝突被害軽減ブレーキシステムの設定内容を示している。作動特性を設定するにあたり、本間ら⁴⁻⁸⁾の論文を参照し、警報の作動はTTCが 1.8[s]のタイミング、自動ブレーキの作動は 0.6[s]のタイミング、自動ブレーキの減速度は 7.8[m/s²]とした。さらに、ドライビングシミュレータを用いた実験によって、ドライバが前方から視線を外した状態から警報によって前方を視認する状態に復帰するために要する時間の累積頻度も報告されていることから、警報に対する反応時間の設定の根拠としても同様に参照した。

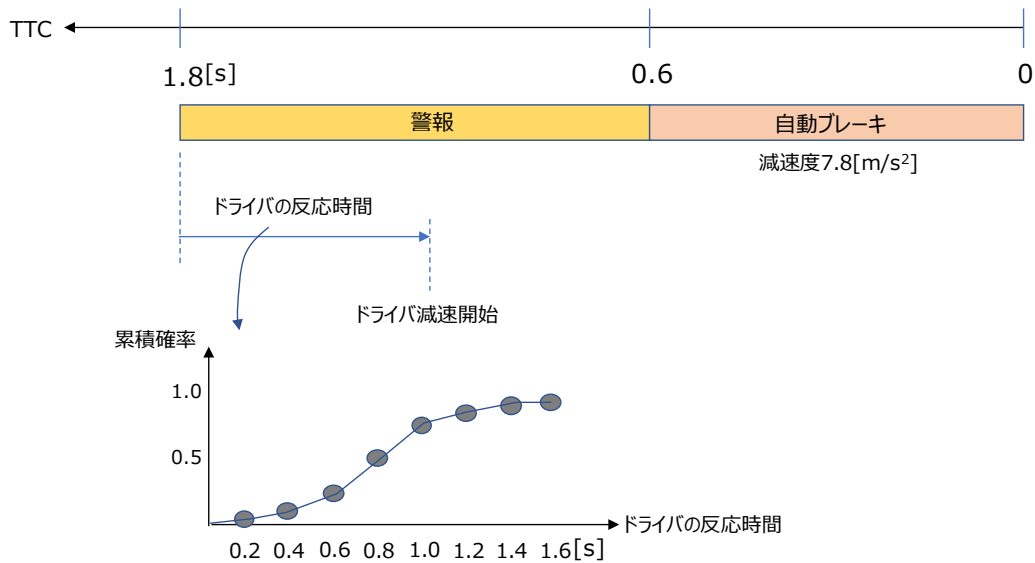


図 4.2.3-1 衝突被害軽減ブレーキ（AEB）システムの作動条件

図 4.2.3-2 は、今回のシミュレーションで設定した車線逸脱警報システムの設定内容を示している。自車が走行する車線の中央と車両右端または左端の距離が左右に 1[m]以上になった状態で警報が作動するように設定した。警報に対するドライバーの反応時間は、前述の反応時間特性と同様であるという仮定で設定した。ドライバーが警報に対して反応した場合、その後の操舵制御はドライバーによって実行されるように設定した。

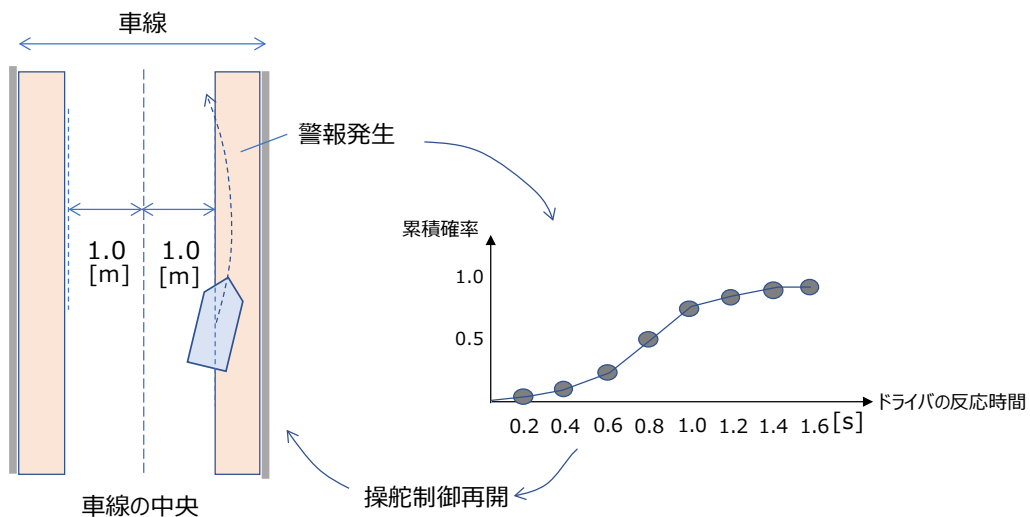


図 4.2.3-2 車線逸脱警報（LDW）システムの作動条件

このように、評価対象となる自動走行システムの作動特性を定義するために必要なパラメータ（システム用のセンサ特性、作動内容の機能の定義、機能が作動するための指標、指標にもとづく作動タイミングの閾値、作動内容を示す特性値）の用意と、作動内容を任意で設定できるようにしておくことが重要である。

(2) 緊急時・平常時に作動する自動走行システム

自動運転レベルが高くなることでドライバによる監視が前提としない自動走行システムの場合、実用化されている自動走行システムの例はほとんど該当しないことから、(1)のシステムと状況が大きく異なる。従って、その作動内容については現時点で参照できる公知の事例が少ない。さらに、システムの機能や性能は今後継続的に発展していくことを前提とすることが必要である。

そのため、本シミュレーションにおいてこのような自動走行システムを評価対象とするためには、将来的にセンサを追加したり、センシング範囲を拡大したり、判断や制御ロジックを入れ替えたりする設定の変更が任意にできるような枠組みを用意することが肝要といえる。

今回の機能確認のためにシミュレーションで暫定的に設定した自動走行システムのセンサ仕様は、一般道でのレベル3以上の自動走行システムを実現するために要求される仕様を参照した(図4.2.3-3)。さらに、判断と操作に関する作動内容については法順守傾向の高いドライバエージェントによる判断モデルと反応時間を必要としない操作モデルで代用することとした。

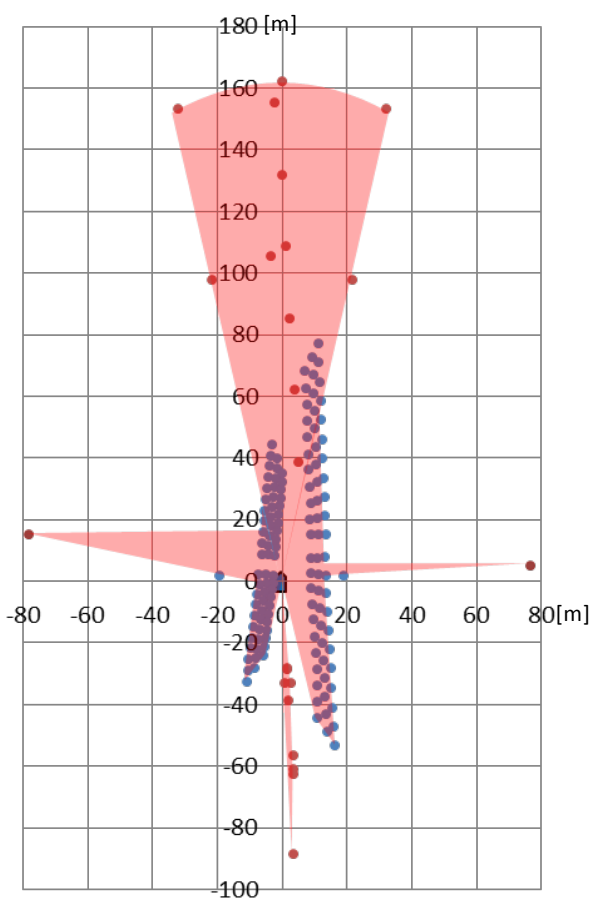


図 4.2.3-3 自動走行システム用のセンサ仕様⁴⁻⁹⁾

4.2.4 効果評価用のロジックの検証

(1) 自動車乗員、自転車乗員、歩行者の傷害評価用のロジック

乗員の傷害評価を行うため、本研究ではAACN(Advanced Automatic Collision Notification、先進交通事故自動通報システム)の傷害予測アルゴリズムとして提案されている手法を採用している。富永ら⁴⁻¹⁰⁾は、米国事故データNASS/CDS(National Automotive Sampling System/Crashworthiness Data System)にロジスティック回帰式モデルを適用した従来の乗員の傷害予測モデルについて、日本の交通事故実態を反映することを意図してアルゴリズムを構築している。

傷害予測アルゴリズムでは、傷害予測を行う対象を運転席乗員に設定し、その死亡重傷確率を計算するアルゴリズムを、式 4.2.4-1 のような二項ロジスティック回帰モデルを用いて構築している。

$$p = \frac{1}{1 + \exp(-z)} \quad \text{式 4.2.4-1}$$

$p=0$:軽傷、無傷、 $p=1$:死亡、重傷

ここで、 p は、死亡あるいは重傷となる発生確率であり、 z はリスクファクタの組み合わせによる衝突モードを表現する線形結合和であり、式 4.2.4-2 で表される。

$$z = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i \quad \text{式 4.2.4-2}$$

x_i は、個々のリスクファクタの区分化された変数群である。 β_i は、それぞれの x_i の偏回帰係数であり、最尤法により推定される。

本アルゴリズムのリスクファクタは以下の 6 つである。

a. 疑似デルタ V[km/h]

デルタ V とは衝突時の速度変化を示すものであり、EDR(Event Data Recorder)が搭載されていれば記録されるが、交通事故統合データベースには記録されていない。そのため、疑似デルタ V として、二車両の質量と危険認知速度を用いて以下の式 4.2.4-3 で表すものである。

$$\text{DeltaV}_{\text{pseudo}} = \frac{m_1}{m_1 + m_2} (v_1 + v_2) \quad \text{式 4.2.4-3}$$

ここで、 m_1 :車両 1 の質量[kg]、 m_2 :車両 2 の質量[kg]、 v_1 :車両 1 の危険認知速度[km/h]、 v_2 :車両 2 の危険認知速度[km/h]である。なお、シミュレーションから得られる速度情報は

衝突速度が得られるため、疑似デルタVではなくデルタVとして算出される。また、2台の車両が正面衝突のような形態で衝突する場合には v_1 と v_2 は加算されるが、追突事故のような形態で衝突する場合には v_1 と v_2 は減算される。出会い頭事故のような形態で衝突する場合には、前面が衝突する側の車両の速度のみを用いて算出する。

b. 衝突方向

衝突方向は、前面、ニアサイド、ファーサイド、後面の4方向とする。交通事故統合データベースに登録されている衝突部位のうち、①・⑤・⑧を前面、②をニアサイド、④をファーサイド、③・⑥・⑦を後面とする（図4.2.4-1）。

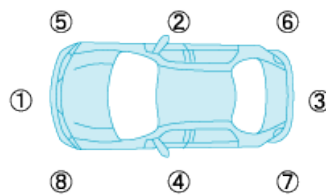


図 4.2.4-1 衝突部位

c. シートベルト着用の有無

乗員がシートベルトを着用している場合を「有」、着用していない場合を「無」とする。

d. 多重衝突の有無

事故時の車両挙動によって、2回以上の衝突が発生した場合に多重衝突を「有」とし、1回の衝突のみが発生した場合に多重衝突を「無」とする。

e. 乗員年齢

年齢層区分は、54歳以下、55～64歳、65歳以上の3区分とする。

f. 車種

車種別効果を表現するため、軽自動車と乗用車の二つを設定する。乗用車には小型乗用車も含まれる。

また、西本ら⁴⁻¹¹⁾は、日本の交通事故死者数は約36[%]を歩行者が占め、約14[%]を自転車乗員が占める実態に対応するため、歩行者および自転車の乗員の重傷度を予測するための傷害予測アルゴリズムを構築している。この研究におけるリスクファクタは危険認知速度、歩行者・自転車乗員の年齢、車種、道路形状、事故類型としている。このアルゴリズムは、自転車乗員との衝突、歩行者横断事故の場面のシミュレーションを実施する場合に採用することが有効である。

木内ら⁴⁻¹²⁾は、交通事故自動通報システム用に実際に運用されているアルゴリズムに基づいて算出した死亡重傷率とアンダートリアージとオーバートリアージの関係を分析しており、その結果から交通事故自動通報システムがドクターヘリ出動を要請する基準として

5%を採用することが妥当であると主張している（図 4.2.4-2）。この値を参照し、乗員の傷害が重傷であるかどうかを判別する基準として5[%]に暫定的に設定する。軽傷や死亡についても本報告の結果を参照して検討することが有効であると考えられる。

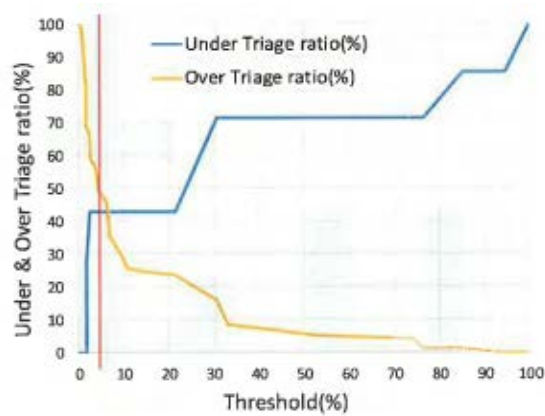


図 4.2.4-2 死亡重傷率とアンダートリアージとオーバートリアージの関係

図 4.2.4-3 は、傷害評価モジュールの構造を示している。傷害評価を実施するため、衝突速度のみを用いて傷害発生率と速度の累積分布に適用して簡易的に計算する方法と日本の膨大な交通事故データに基づいて事故条件と乗員傷害の結果を説明する傷害予測アルゴリズムがある。傷害予測アルゴリズムでは、車種の組み合わせ・乗員年齢・ベルト着用・多重衝突の有無などの差異を考慮できるため、本事業では傷害予測アルゴリズムを採用することが有効と考えられる。ただし、多重衝突の有無については、シミュレーション内で直接評価される対象ではないので、事故ログファイルに基づいて多重衝突の有無を別途判定するモジュールを用意することが必要である。本事業では、多重衝突の有無を判定することが直接的な目的ではないので取り扱わないことにする。ただし、将来的な効果評価の拡張性を確保するため、インプット用のパラメータとして用意する。

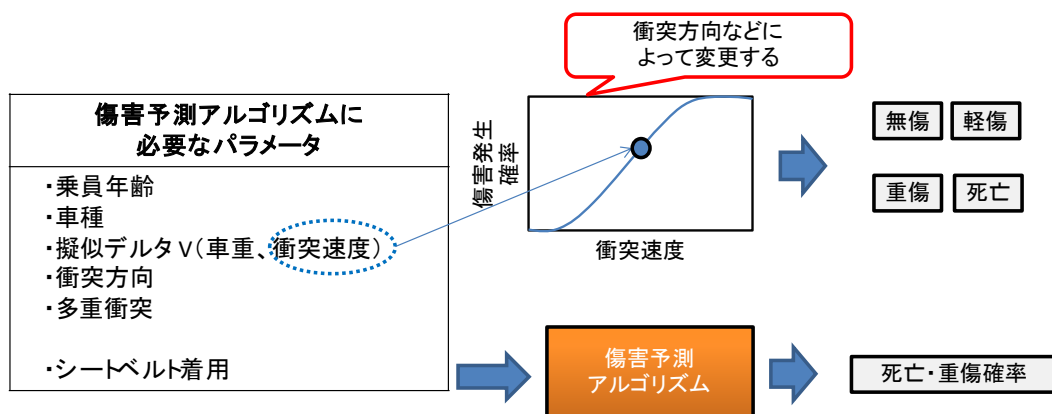


図 4.2.4-3 傷害評価モジュールの構造

(2) 事故渋滞の発生可能性予測用のロジック

事故発生後の車両の挙動を衝突条件に基づいて判定することによって、事故渋滞が発生する可能性を判定し、将来的な CO2 削減効果の定量化に向けたモジュールを検討した。今回、衝突時の二車両の挙動を判定するシミュレーションソフトとして Analytical Impact Model を用いた挙動再現をする CARS2D を活用することが有効と考えられる。

このソフトでは、衝突時の車両挙動を判定するために①車両諸元（二車両）、②衝突条件（衝突位置・衝突角度・衝突位置）、③タイヤ条件、④ブレーキ制御条件（衝突後の制動条件）を用いている。パラメータの入力によって衝突時の条件を設定し、図 4.2.4-4 に示したように衝突時の初期状態から二台の車両が最終的に停止する状態までの挙動を予測できる。

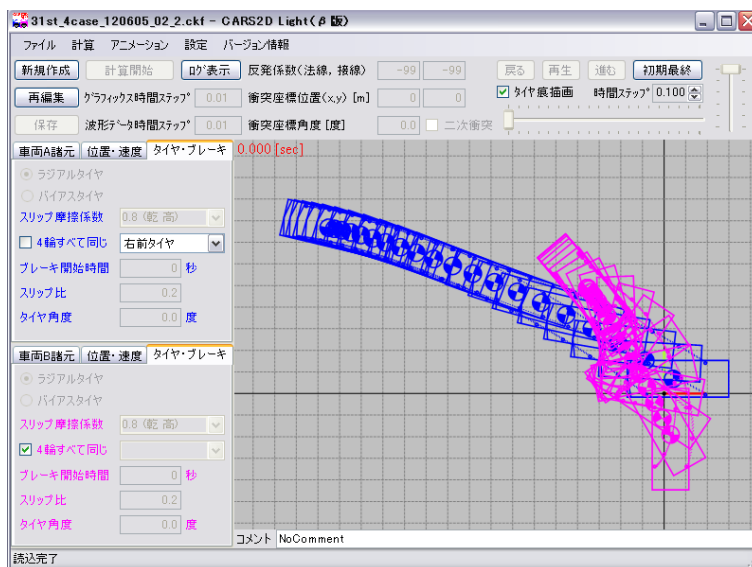


図 4.2.4-4 車両挙動判定モジュールによる出会い頭事故時の車両挙動の予測

図 4.2.4-5 は、事故渋滞が発生する可能性を評価するための衝突後の車両挙動を簡易的に判別するモジュールの構造を示している。衝突速度、衝突角度、車両重量に基づいて車両挙動を解析するため、既存の外部ソフトウェアを用いて二車両の最終停止位置を把握する。さらに、最終停止位置と事故発生地点の地図情報を照合することで、車線を塞ぐことで交通障害の影響が発生するかどうかを判別する。車両挙動を判別するために剛体解析ソフトウェア（CARS 2D）を簡易的な挙動の評価に活用することが効果的と考えられる。

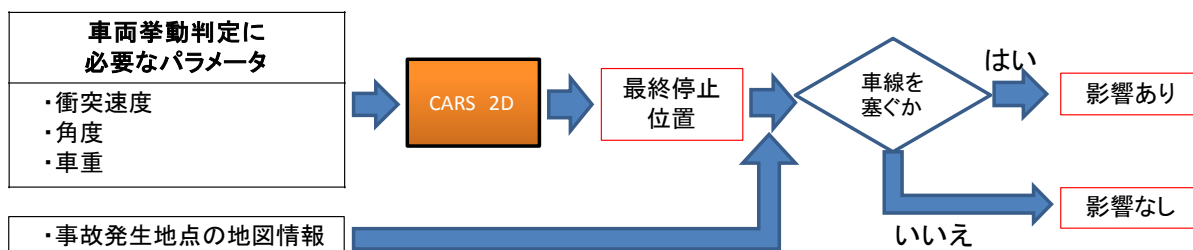


図 4.2.4-5 車両挙動判定モジュールの構造

図 4.2.4-6 は、交差点の出会い頭事故を想定した車両挙動判定を行った事例を示している。車両 1（青車両）の最終停止位置が交差点付近で車線を塞いでいることから、事故渋滞が発生する可能性のある事故であると判定する。

ただし、事故時の車両挙動の結果に基づいて事故渋滞への影響を判別することはできるが、事故渋滞の総延長距離や継続時間などの観点で定量化することは困難と考えられる。また、CARS 2D は Analytical Impact モデルに基づく運動量保存則を計算しているため、上記パラメータに加えて衝突中心や衝突の法線・接線方向の設定も必要になる。これらの設定は自動で設定されるものではなく、解析する際に利用者が自ら設定しなくてはならないことになる。

以上のことから、事故渋滞への影響については、事故ログファイルに格納される事故を個別に判別する方式ではなく、衝突形態（正面衝突・追突事故・出会い頭事故など）、車種の組み合わせ（普通乗用車対普通乗用車、乗用車対軽乗用車、乗用車対大型貨物車など）、衝突条件の組み合わせ（衝突速度、衝突角度）に関するパターン別の渋滞への影響の度合いを予め用意しておき、事故ログファイルに格納されている事故条件と照合することが効率的であると考えられる。

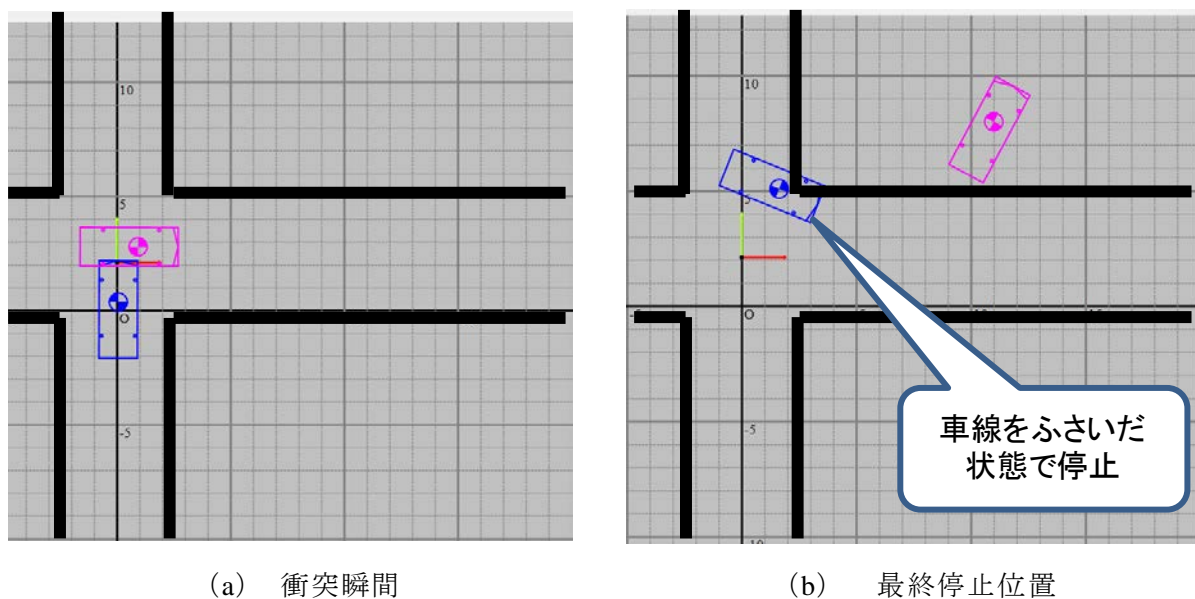


図 4.2.4-6 CARS 2D を用いた衝突挙動計算の例（出会い頭事故の場合）

4.2.5 事故低減詳細効果の検証

自動走行システムの普及・高度化に伴う事故低減詳細効果について議論するためには、図 4.2.5-1 に示したようなステップでそれぞれ妥当な方式や手続きが採用されているのかを確認することが前提となる。

具体的な確認内容としては 4.2.1～4.2.4 において述べたことが必要となるが、とくに重要となるのは自動走行システムがない状態で得られたシミュレーション結果が交通事故統計が表す事故実態を模擬できているかどうかである。模擬するために必要かつ妥当な枠組みを構築できているかは、交通参加者のモデル化（ステップ①）、事故シナリオの設定（ステップ②）で実施する。

構築されたシミュレーションを自動走行システムのない条件で実施した結果について、交通事故統計に記録されている事故件数、事故類型別の全体の事故件数、死者数、重傷者数、軽傷者数などの観点で事故実態をどの程度対応しているのかを確認する。事故実態の基本的な傾向（事故類型別の事故件数の構成率、事故類型別の致死率・死亡重傷率）を模擬できることを確認したことをもって、自動走行システムを導入・普及した条件でのシミュレーションを実行する段階に移行できる。

自動走行システムの作動特性については、前述したように具体的に参照できるものと、様々な仮定に基づいて設定するものがあるため、設定の根拠とした知見および仮定の内容をシミュレーションの実行時に記録しておく必要がある。これらの設定条件・仮定条件の妥当性についてはステップ③で確認する。

自動走行システムのない条件でのシミュレーション結果、自動走行システムのある条件でのシミュレーション結果を比較することによって事故類型別の事故件数などの変化を定量化が可能となる。ここで、事故低減詳細効果を算出するためには死亡・重傷・軽傷といった乗員（自動車・自転車）・歩行者の傷害の評価、発生した事故が渋滞を引き起こす可能性の評価することが必要であり、そのために妥当な効果評価ロジックを採用しているかについてはステップ④によって確認する。採用した効果評価ロジックに必要なデータはシミュレーション内で記録されるように構築することが必要となる。

以上、自動走行システムの導入・普及による事故低減効果の評価結果を議論するためには、ステップ①～④を適切に実施することが前提となる。とりわけ重要となるのは、自動走行システムがない条件でいかに事故実態を模擬できているかを確認することである。

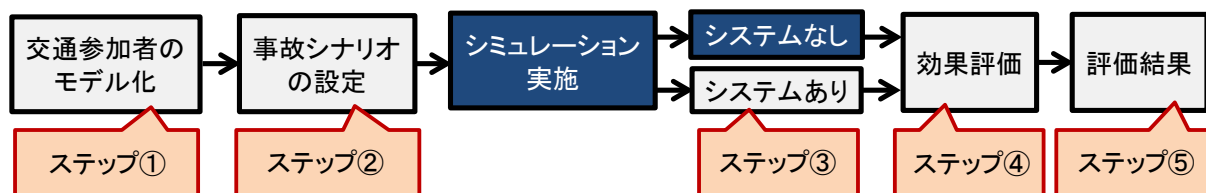


図 4.2.5-1 シミュレーション技術の妥当性を検証するための確認ステップ

4.3 最終的な事故低減詳細効果の推計に向けた構想まとめ

交通環境再現型シミュレーションを活用し、全国規模の事故低減効果を算出することが本事業の最終的な目標である。ただし、交通環境再現型であってもシミュレーションの対象範囲を全国規模の範囲に設定することはできず、あくまで限定的な範囲での実施が基本となる。従って、限定的な範囲で得られるシミュレーション結果について妥当性を確認し、その上で全国規模へいかに換算するのが重要な課題となる。

(1) 事故低減効果の推計に向けた効果評価プロセス

図 4.3-1 は、全国規模の事故低減効果を推定するための効果評価プロセスの全体像を示したものである。交通環境再現型シミュレーションをどのように活用して最終的な結果を得るかについてのプロセスを検討したものであるが、まず第一に、開発したシミュレーションが交通流を再現できているかを確認することが重要である。たとえば、シミュレーションの対象範囲における交通量や旅行速度（混雑時／非混雑時）といった一般交通調査の公開されている結果を参照して確認する。

つづいて、全国に 1,700 以上存在する市区町村から、代表する自治体（たとえば 3 種類）を選定し、シミュレーション用の地図として作成する。その地図において自動走行システムがない条件でシミュレーションを実行した結果が事故実態に対応しているか確認する。このとき、交通事故統計や交通量と事故率の関係などの事故実態を示す統計データに基づいて確認を行う。この確認を行った上で、自動走行システムが普及した条件でのシミュレーションを実行して低減効果を定量化する。

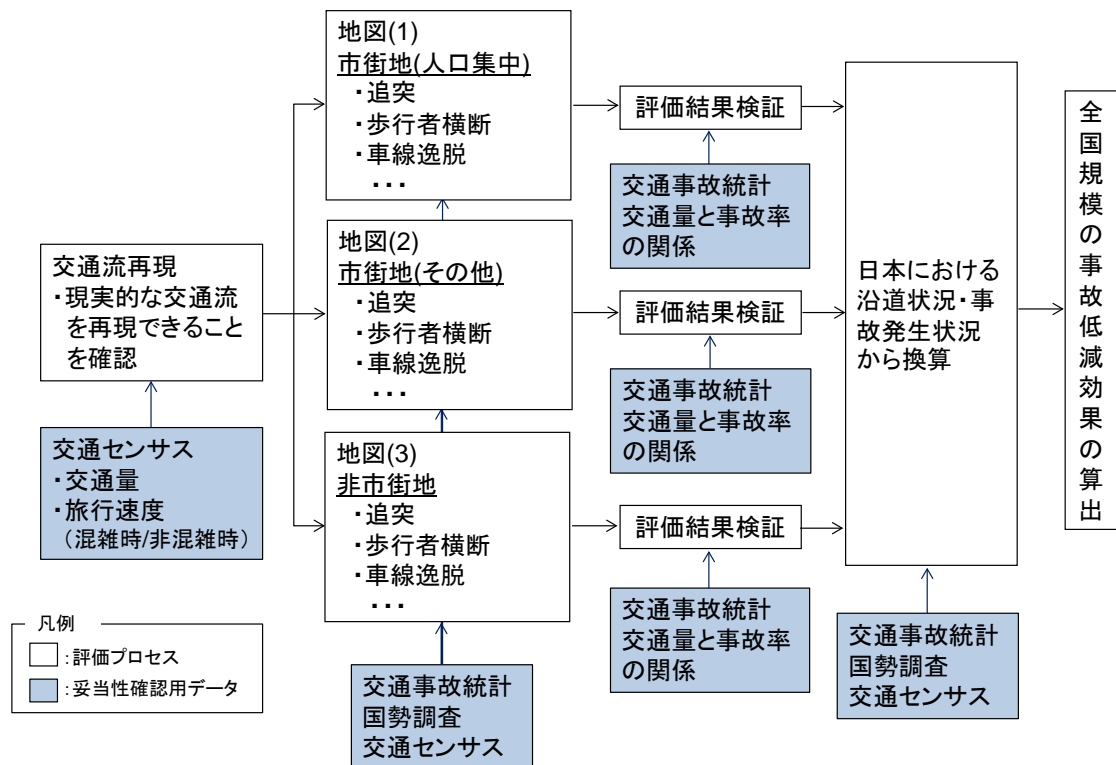


図 4.3-1 全国規模の事故低減効果を推計するための効果評価プロセス

全国規模の事故低減効果に換算していくために、市区町村別の特性と事故実態の特徴の関係を把握し、特徴に応じて換算する手法を検討し、得られた結果を換算するための条件・根拠を明示して最終的な低減効果を推計するプロセスを提示することが必要である。

(2) 手動走行シナリオのシミュレーション結果と事故実態の対応関係の確認

前述したように、自動走行システムがなくすべてのエージェントが手動走行となるシナリオでのシミュレーション結果が事故実態と対応しているかどうか自動走行システムの効果推計の基本的な前提条件である。

図 4.3-2 は、つくば市を対象とした場合の手動走行が 100[%]のシナリオで実行したシミュレーションで発生した事故の事故類型別の発生地点と平成 24 年～29 年の実際に起きた事故の発生地点を比較したものである。



図 4.3-2 手動走行シナリオのシミュレーションと交通事故統計の発生地点の比較

対応関係として確認する内容は、個別の事故と同一の発生状況になっているかというミクロ的な観点で実施することではなく、シミュレーション対象範囲における事故類型別の事故件数の構成率、路線別（県道や国道などの幹線道路、住宅街・非市街地などの非幹線道路）に発生している事故類型別の事故件数の構成率などのマクロ的な観点で実施することである。

上記の確認を実施するため、茨城県が県民に対して県内の交通死亡事故等の発生状況の把握と安全運転の意識啓蒙のために公開している交通事故発生マップ⁴⁻¹³⁾を活用することが有効である。

(3) 日本における市区町村の特徴の分類

日本における市区町村は 1,700 以上存在し、人口の多さ、人口密度の高さ、都市の役割などの観点から様々な特徴を有していると考えられる。そのなかで、交通事故の特徴、自動車の使用形態、自動走行システムに求める内容といった観点で市区町村を分類することによって全国規模の推計のために優先的に検討すべき都市を選定できると考えられる。鈴木ら⁴⁻¹⁴⁾によると、交通システムを導入する上で物理的・政策的な制約条件として都市構造に着目する必要があると述べている。また、都市構造については、人口規模（人口集積地・自治体としての規模）、人口密度の大きさの関係によって以下に示した 7 種類に分類できると述べている。

①過密型大都市

「人口が 100 万人以上」かつ「人口密度が 5000[人/km²]以上」の都市であり、自治体の財政規模やモビリティサービスとしての事業性の両面から、鉄道などの公共交通の整備の可能性も含めて最も自由度が高い地域といえる（東京 23 区、大阪市、川崎市、横浜市、名古屋市、さいたま市のみ）。

②大陸系大都市

「人口が 100 万人以上」かつ「人口密度が 5000[人/km²]以下」の都市である。米国や欧州大陸系の大都市のように、自治体としての規模は大きい、比較的広範に人口が分布しており、結果として交通システムとしては自動車を中心となっている場合が多い（福岡市、神戸市、京都市、札幌市、仙台市、広島市）。

③ベッドタウン

「人口密度が 2000～3000[人/km²]以上」で、一つめと二つめに該当する大都市に隣接している都市である。鉄道・バスなどの公共交通網が隣接する大都市を起点に一体で整備されることが多く、一定以上の人口密度が担保されている。このためモビリティサービスの導入においてもサービス採算の面からも、一定の自由度がある地域といえる（代表例：首都圏なら川口市、市川市、町田市など、大阪圏なら豊中市、吹田市、尼崎市など、名古屋圏なら一宮市、春日井市、岐阜市など）。

④地方中核都市

「人口が約 30 万人以上」かつ「人口密度が 1000[人/km²]～約 3000[人/km²]」である。これらの定量的な基準に加え、実態としての都市機能として一つめと二つめの大都市圏とは独立した場所に立地しており、後で説明する六つめの「郊外・地方住宅地」の自治体と広域的な都市機能を形成しているような都市が該当する（代表例：那覇市、熊本市、和歌山市、倉敷市、久留米市、宇都宮市、松山市、新潟市、高松市、高知市、鹿児島市、長崎市など）。

⑤大陸系地方都市

「人口密度が 1000[人/km²]以下」だが「人口規模が約 10 万人以上」の都市である。自治体として一定の人口・財政規模があるが人口密度が全体的に低く（もしくは特に低い過疎地を自治体内に包含しており）、交通システムとしては完全に自動車主体になっているような都市である（代表例：金沢市、大分市、岡山市、福山市、高崎市、宮崎市、浜松市、静岡市、旭川市、豊田市、長野市、郡山市、秋田市、富山市など）。なお、平成 29 年度のシミュレーション対象としたつくば市（人口 21 万人、人口密度 755[人/km²]）は大陸系地方都市に該当する。

⑥郊外・地方住宅地

「人口が 30 万人以下」で「人口密度が約 100[人/km²]～2000[人/km²]」の都市である。前述した四つめの地方中核都市に対するベッドタウン（三つめのベッドタウンほど人口密度が高くない）に加え、完全に人口が分散した地方部の自治体が含まれる。地方部で自動車中心の交通システムになっていることに加え、個々の自治体としてはあまり規模が大きくないため、公的なインフラ整備の余力も限られることが多い。

⑦過疎地

「人口規模が約 10 万人以下」で「人口密度が 100[人/km²]以下」の地域である。人口がまばらで自治体の規模も小さいため、交通弱者対策の面で最もニーズが高い地域といえる。

図 4.3-3 は、上記の分類基準に基づいて平成 22 年の全国市区町村別の人口と人口密度のデータと分類した結果を示している。①過密型大都市には 6 自治体（0.3[%]）、②大陸系大都市にも 6 自治体（0.3[%]）、③ベッドタウンには 175 自治体（10.1[%]）、④地方中核都市には 16 自治体（0.9[%]）、⑤大陸系地方都市には 106 自治体（6.1[%]）、⑥郊外・地方住宅地には 808 自治体（46.8[%]）⑦過疎地には 593 自治体（34.3[%]）がそれぞれ該当した。

図中につくば市（人口 21.4 万人、人口密度 755[人/km²]）を示すと、大陸系地方都市型のなかでは比較的人口が多く、人口密度も高い都市に位置付けられることがわかる。

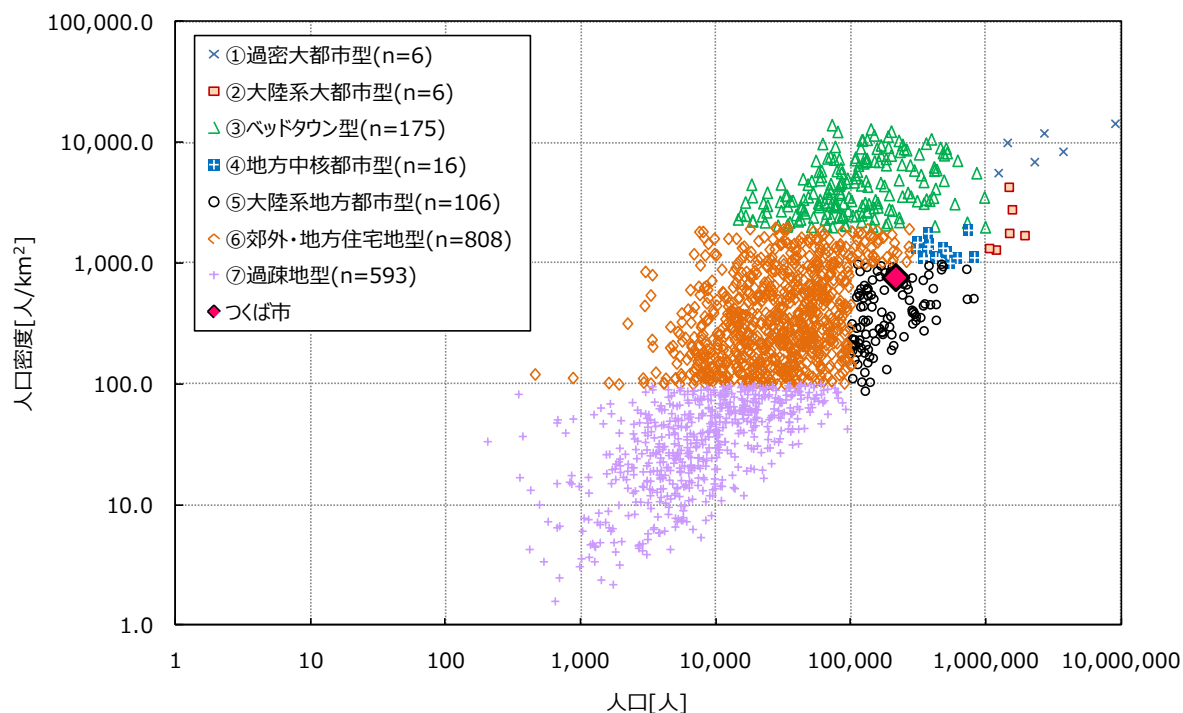


図 4.3-3 分類別の全国市区町村別の人口と人口密度の関係（平成 22 年国勢調査）

分類した自治体の交通事故の発生状況を比較するため、図 4.3-4 に分類別の交通事故死者数と人口当たりの死者数を比較した結果を示した。

死者数の構成率でみると、最も多いのは⑥郊外・地方住宅地（34.8[%]）であり、つづいて⑤大陸系地方都市（20.3[%]）、③ベッドタウン（14.4[%]）、⑦過疎地（12.0[%]）であった。人口 1 万人あたりの死者数でみると、最も高いのは⑦過疎地（0.873[人/万人]）であり、つづいて⑥郊外・地方住宅地（0.517[人/万人]）、⑤大陸系地方都市（0.438[人/万人]）、④地方中核都市（0.362[人/万人]）であった。

死者数の構成率が多く、人口あたりの死者数が高い分類として該当したのは、⑤大陸系地方都市、⑥郊外・地方住宅地、⑦過疎地であった。これらの自治体は、①過密大都市・②大陸系大都市、③ベッドタウンに比べて自動車の保有台数が高いこと、交通手段として自動車を選択されやすいこと、人口密度・車両密度がともに小さいことが挙げられるため、自動車の移動速度自体が高いために交通事故が発生した場合の被害が大きくなる特徴があるものと考えられる。

ただし、今回参照した都市構造の分類が事故実態を把握する上で妥当な方式を採用しているかについては、自動車保有台数、軽自動車保有台数、高齢人口、昼夜人口などの統計データを活用して別途確認することが今後の課題である。

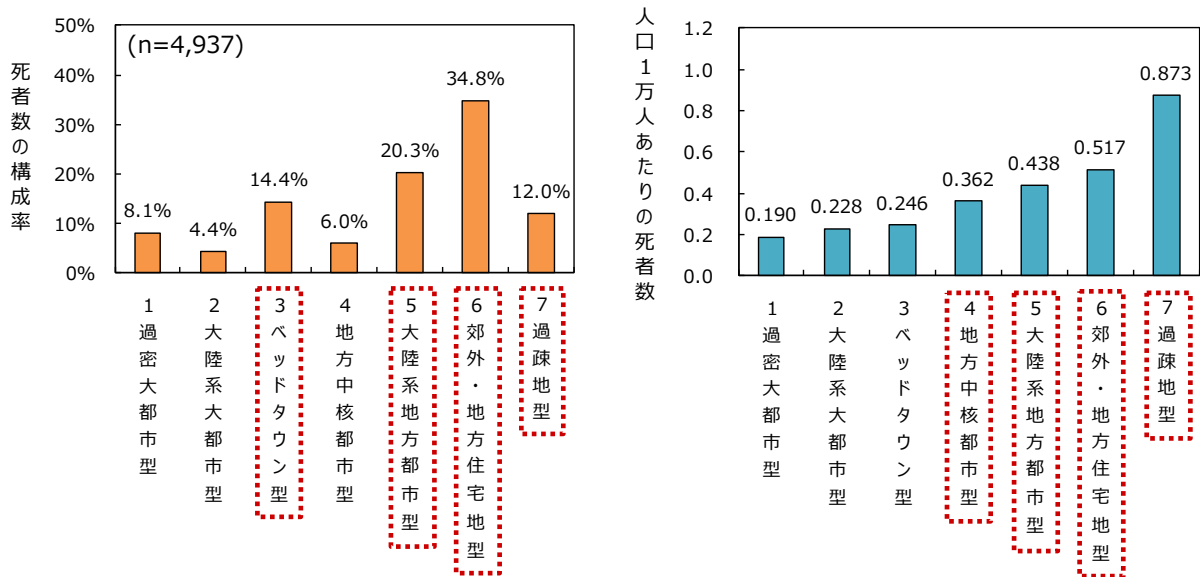


図 4.3-4 分類別の交通事故死者数の構成率と人口あたりの死者数の比較（平成 22 年）

4.4 まとめ

(1) 交通環境再現型シミュレーションの機能確認

ドライバや歩行者のエージェントが通常の行動から危険な行動までを各自が実行する交通環境再現型シミュレーションの機能を確認した。今回はつくば市を対象とした 6[km]×3[km]の範囲でシミュレーションを実施し、各エージェントの行動の組み合わせによって追突・車線逸脱・正面衝突・出会い頭・歩行者横断の事故類型の事故が発生することを確認した。さらに、すべて手動走行のシナリオに加えて、手動走行と様々な自動走行システムが混在するシナリオを設定することで、事故件数の定量的な比較や事故発生地点の比較などが可能になることを確認した。

(2) シミュレーション技術の妥当性の確認

交通環境再現型シミュレーションで得られた結果が妥当であるかを確認するためには、交通参加者の行動モデル、事故シナリオ、自動走行システムの作動特性、効果評価用のロジックについてそれぞれ妥当性を確認することが前提である。今回のように特定の都市をモデルとして実施する場合には、人口、人口密度、運転免許保有者数、交通量、旅行速度などのデータに基づいてドライバや歩行者のエージェントの属性・数の設定、シミュレーション内の交通量や走行速度の観点で確認する必要がある。さらに、シミュレーションで得られた結果のうち、手動走行のシナリオで発生した事故類型別の事故件数や発生地点といったマクロ的な傾向について交通事故統計データに基づいて対応しているか確認することが事故低減効果の推計に向けた極めて重要なステップである。

(3) 最終的な事故低減詳細効果の推計に向けた構想

全国規模の地図・交通流をシミュレーションの対象とすることはできないため、事故低減効果を推計するために代表的なモデルを対象とした結果をベースに全国規模に換算していくことが現実的な推計手法と考えられる。本事業において最終的な推計結果を得るためには、事故実態の特徴に基づく代表モデルの選定、選定された代表モデルのシミュレーションによって現実的な交通流が再現されているかの確認、手動走行シナリオで発生した事故類型別の事故件数・発生地点の特徴に対応しているかの確認が必要である。そのためには国勢調査、道路交通センサス、交通事故統計などの各種データを活用して妥当性を確認し、その上で最終的に全国規模へ事故低減効果を換算する手法を考案する。

参考文献

- 4-1) 経済産業省：戦略的イノベーション創造プログラム（自動走行システム）：交通事故低減詳細効果見積もりのためのシミュレーション技術の開発及び実証報告書、p.124、2017
- 4-2) 熊谷：運転支援システムによる交通事故低減効果の分析、自動車技術会春季大会学術講演会、学術講演会予稿集 No.20165314、pp.1667-1670、2016
- 4-3) 国土交通省・自動車事故対策機構：自動車アセスメント、予防安全性能評価－事故を防ぐための新しい技術－、pp.3-20、2017
- 4-4) 内閣府：交通事故死傷者低減の国家目標達成に向けた調査・検討における詳細効果見積もりのためのシミュレーション技術に係る調査検討、pp.55-65、2015
- 4-5) 北岡ら：交通シミュレーション、自動車技術会春季大会フォーラム～交通安全対策の効果予測する～フォーラムテキスト、pp.17-32、2011
- 4-6) つくば市：つくば総合都市交通体系調査報告書、pp.9-30、2012
- 4-7) D. N. Lee: A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision, Perception, Vol.5, Issue4, pp.437-459, 1976
- 4-8) 本間ら：前方車両衝突防止支援システムの効果予測：危険の予期が低いドライバの衝突予知警報に対する反応特性、自動車技術会論文集、Vol.43、No.3、pp.769-775、2012
- 4-9) 経済産業省：平成 28 年度スマートモビリティシステム研究開発・実証事業：自動パーキングの実証及び高度な自動走行システムの実現に必要な研究開発成果報告書、pp.IV-28-IV-49、2017
- 4-10) 富永ら：日本の交通事故実態を反映した AACN 傷害予測アルゴリズムの研究、自動車技術会論文集、vol.46、No.5、pp.925-930、2015
- 4-11) 西本ら：歩行者および自転車乗員保護のための AACN 傷害予測アルゴリズムの構築、自動車技術会論文集、vol.46、No.6、pp.1123-1129、2015
- 4-12) 木内ら：事故自動通報データによる D-Call Net アルゴリズムの評価、自動車技術会秋季大会学術講演会、学術講演会予稿集 No.20166241、pp.1272-1275、2016
- 4-13) 茨城県：いばらきデジタルまっぷ、交通事故発生マップ（平成 24 年～29 年）
https://www.pref.ibaraki.jp/kenkei/a01_safety/map/traffic.html、2018 年 2 月 21 日
- 4-14) 鈴木ら：自動運転とモビリティシステム、変えるのは誰か（第 2 回）
－世界各国の都市構造はこれだけ違う－、日経テクノロジーオンライン
<http://tech.nikkeibp.co.jp/dm/atcl/column/15/012700094/020800007/>、2017 年 2 月 20 日

第5章 シミュレーション技術に関する国内外の最新動向調査

本章では、シミュレーション技術に関する国内外の最新動向調査を行った結果、および、本事業の成果について対外的に報告した内容について述べる。

5.1 AdaptIVe

5.1.1 概要

自動走行の社会実装を目指して平成26年1月から平成29年6月まで推進された、予算規模€2500,000の欧州委員会プロジェクトである。完成車メーカ、車両部品メーカ、大学・研究機関、合計26の研究参画者によって手がけられた。最終成果報告会が平成29年6月28日および29日にドイツ、アーヘン市において行われた。実施事業に関する説明と得られた成果の発表がなされ、事前抽選によって選ばれた参加者は、AdaptIVeで作成されたデモンストレーション車両の見学および試乗を行った。

研究対象はSAEレベル1~4の自動走行機能であり、適用する場面は30[km/h]未満の駐車場(Parking)、70[km/h]未満の市街地(Urban)、130[km/h]未満の高速道路(Highway)と設定している。ただし、具体的なシステムというワンパッケージでまとめられたものではなく、システムが実現する「機能」の観点から整理している。

表 5.1.1-1 AdaptIVe で扱われた三場面と SAE 自動化レベルの対応

	SAE Lv.0	SAE Lv.1	SAE Lv.2	SAE Lv.3	SAE Lv.4	SAE Lv.5
< 30 km/h			Parking	Parking	Parking	
< 70 km/h		Urban	Urban	Urban	Urban	
< 130 km/h			Urban Highway	Urban Highway	Urban Highway	

※最終報告書⁵⁻¹⁾およびFinalEvent配布冊子より引用し整理した。

表 5.1.1-1 は AdaptIVe で扱われた場面と自動走行機能の対応である。SAE の自動化レベルでレベル2からレベル4に相当する機能を取り扱っている。

AdaptIVe では個別の研究テーマを実施するサブプロジェクト (SP) として、以下の7個を設定している。

- (1) SP.1 IP Management
全体統括、対外調整
- (2) SP.2 Response4
社会受容性・制度・法規の研究
- (3) SP.3 Human Vehicle Integration
人間-車両系の研究
- (4) SP.4 Automation in closed distance scenario
駐車場シナリオの事例研究
- (5) SP.5 Automation in urban scenario
市外路シナリオの事例研究
- (6) SP.6 Automation in highway scenario
高速道路シナリオの事例研究
- (7) SP.7 Evaluation
自動走行機能の評価法を研究

この中で本事業と特に関連があるのは SP7 で取り扱われる自動走行機能の評価と、その具体事例となっている、SP6 で扱われた高速道路における自動走行である。

5.1.2 Adaptive における自動走行機能の評価

自動走行の機能の評価する観点はこの 4 点である。

- (1) Technical Assessment
機能によって実現される性能について評価、検証
- (2) User-related Assessment
ドライバと機能のインタラクションを評価、検証
- (3) In-Traffic Assessment
自動走行機能が交通流に与える影響を検討
- (4) Impact Assessment

自動走行機能が社会に与える影響を評価、検証。社会に与える影響として、CO2 排出量などを取り扱う Environment と事故低減を取り扱う Safety、二つの観点についてそれぞれ評価、検証。

特に、Impact Assessment⁵⁻²⁾ のSafetyについては、自動走行システム機能による交通事故数の低減を数値として見積もることを目的としている。効果見積もりの道具としてシミュレーションを活用している点は本事業と共通している。

シミュレーションによる評価は短時間で様々な条件を検証できる点で、非常に効率的な評価が実施できる可能性を秘めている。一方で、現実とは異なり、シミュレーションによる再現の限界が存在することから、シミュレーションが模擬したものが現実と照らし合わせてみたときに何を表すのが重要となる。

AdaptIVe では、交通環境で遭遇する具体的な事例である **Case**：ケースと、これを集約して抽象的な表現をした **Scenario**：シナリオを用いて、シミュレーションによる現実の交通環境の模擬を行っている。図 5.1.2-1 はケースとシナリオを模式的に表したものである。

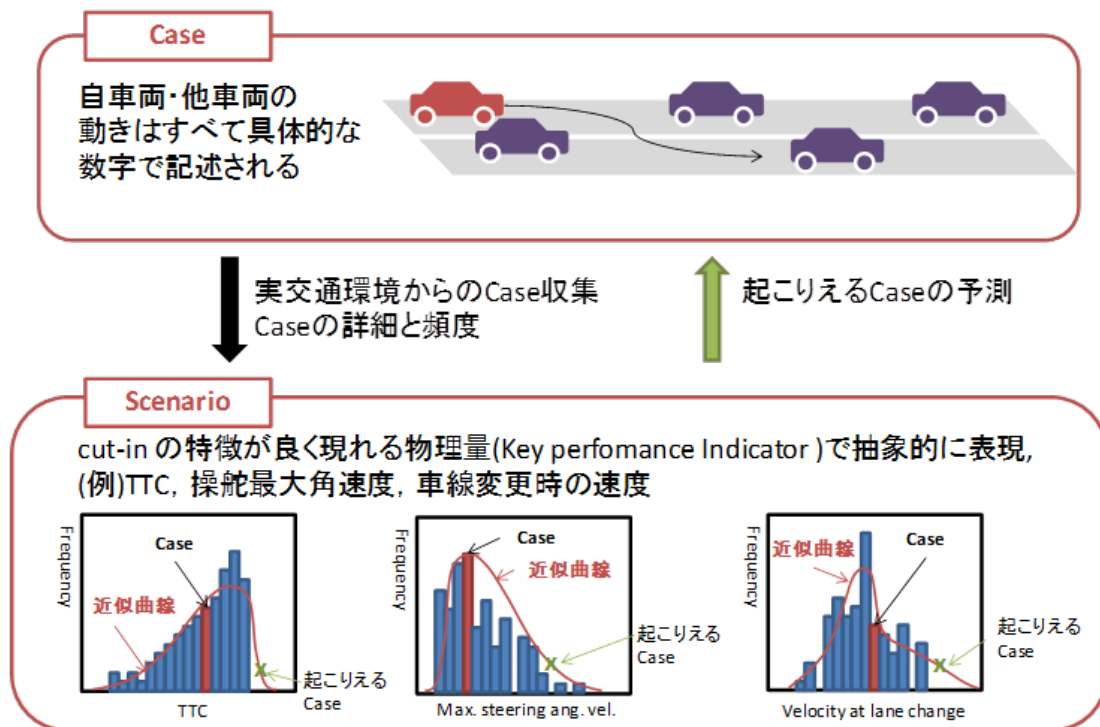


図 5.1.2-1 AdaptIVe におけるケースとシナリオの定義

シナリオは、ケースを集約したものであるため、ある物理量もしくは統計量のパラメータ空間を持っている。ケースはこの空間内にあるパラメータのある一つの組み合わせである。空間内のパラメータの持つ分布はそのシナリオが属する交通の状況を表現している。

シミュレーションによりあるシナリオを再現することで、そのシナリオにおける人間の運転を模擬することができる。これは **Safety Impact Assessment** の基準値となり、これに対して自動走行機能が普及した場合にどのようにシナリオのパラメータ空間における分布が変化するかをみる。たとえば分布の再頻出点が安全な側に移動していれば、自動走行機能の普及によって交通の安全性は増加する可能性があることになる。

模擬するシナリオは道路交通環境を代表するものが望ましい。たとえば事故データはシナリオの代表性を表す指標の一つである。ドイツでは事故データについて詳細を整理した **GIDAS** データベースがある。AdaptIVe では高速道路の 7 シナリオが模擬するシナリオとして選定された。

5.1.3 AdaptIVe 後継プロジェクトによる新たなデータ計測

後継プロジェクトとして、SAE Lv.3 以上の自動走行車の社会普及を目指して欧州ほぼ全域を対象とした自動走行機能の公道実験を行う L3PILOT⁵⁻³⁾のプロジェクトが実施される予定である。プロジェクトの実施期間は平成 29 年 9 月から 48 か月であり、予算規模は€ 6800,000 である。34 の企業、研究所、による合同プロジェクトであり、EU のプロジェクトとして支援を受ける。L3PILOT における交通環境での取得は 11 か国にわたり実施される。車両は合計 100 台、ドライバは 1000 人を予定している。

5.1.4 本調査で得られた結果

効果評価に対する Reference（基準値）は現在の事故状況など、人間の運転行動や現在の事故状況を調査しなければ比較による評価が困難なシナリオの合理的な定義についての議論が各プロジェクトで見られることから、この課題は今後の自動走行分野における研究の重要な要素であると考えられる。即ち Relevant な（頻出する）シナリオを合理的に策定することが重要である。また、オランダでは公道実証実験について認証機関による承認プロセスが存在する模様である。

AdaptIVe など、欧州自動走行プロジェクトは高速道路や駐車場など、限定区間での SAE Lv.3 以上の自動走行機能を実現する目的で実施されているものが多い。ただし、数年内に一般道路も検討対象に入ることが予想される。評価プロセスにおいて実交通環境から抽出されるケースとシナリオの概念が重要である。ただし、いずれも言葉の定義が各プロジェクトで統一されていないこと、シナリオから妥当なケースを生成する過程が欧州でも研究中であることに留意する必要がある。公道で取得されたデータを、ドライバの行動や車両挙動に応じて切り分ける作業が必要であり、これを自動化するため統計手法を活用した研究が多く試みられている。データ加工の方法として統計手法や機械学習に着目したものが多く。ただし、教師データとの選定や着目する計測項目やどのような処理を行うかの選定については、現在のところ専門知識に頼るところが大きい。後継となる L3PILOT で実施されるデータ取得は、AdaptIVe で得られた自動走行車の普及に伴って何が起きるのかという調査研究の裏付けとなることが予想される。

今後予想される動向として、L3PILOT により自動走行車の公道実験が実施されるとともに、実験結果のデータ集約が進む見込みである。集約されたデータからシナリオを抽出する技術の実用化、AdaptIVe で報告されていた機械学習による手法がさらに深化すると思われる。

Impact Assessment が含まれる Evaluation に関する研究は AdaptIVe より引き続き L3PILOT でも実施される見込みである。また、EU プロジェクトから徐々に各国内のプロジェクトへ移行している部分もある。たとえばドイツでは客観性のある評価シナリオ設定に向けた

PEGASUS プロジェクトが存在している。この分野での国際協調（Harmonize）と客観性の担保に関する議論へ我が国も目を向ける必要がある。

5.2 国内動向調査

歩行者挙動のモデル化に関する動向、歩行者の交通事故の再現に焦点をあてた研究の動向、道路上の歩行者の行動に焦点をあてた研究の動向を調査した内容について述べる。

① 歩行予測を取り入れた群衆の2相シミュレーション

著者：伊織瞳、藤田悟、廣津登志夫

文献：情報処理学会シンポジウムシリーズ、Vol.2017 No.1 Page.263-269、2017

各歩行者が数秒後の周囲の歩行者の状態についての予測と、最適な歩行経路探索の2相のシミュレーションをすることによって移動を行う歩行者モデルを提案している。提案モデルを用いた実験の結果、従来モデルにて観測されていた対向者との不自然な接触現象が解消され、いずれの密度においてもスムーズに歩行可能な歩行者が存在する様子を再現することが可能となっている。

② A macroscopic propagation model for bidirectional pedestrian flows on signalized crosswalks

著者：Zhang Yi、Su Rong、Zhang Yicheng

文献：IEEE Conference Proceedings、Vol.2017 No.CDC Page.6289-6294、2017

横断歩道上の歩行者の動きのモデル化と1つの交差のための対応する最適交通信号灯スケジューリングを検討している。双方向流効果に基づいて、巨視的歩行者交通モデルを提示しているが、それはDaganzoセル伝達モデルにいくつかの類似性を持っている。このモデルにより、歩行者交通信号制御問題を混合論理混合整数線形計画法(MILP)問題、等価混合整数線形制約をもつこれらの混合論理制約を置換することにより純粋なMILP問題に変換できるとして定式化している。

③ Agent-based simulation framework for mixed traffic of cars, pedestrians and trams

著者：Fujii Hideki、Uchida Hideaki、Yoshimura Shinobu

文献：Transportation Research. Part C. Emerging Technologies、Vol.85 Page.234-248、2017

道路管理、信号制御、および公共交通についての議論を支援するために使用できる自動車、路面電車、および歩行者の混合交通をシミュレートするための新しい骨格の構築について報告している。実際の都市の路面鉄道増設計画の影響を評価するために提案したフレームワークを使用した結果、既存の自動車交通に提案した路面鉄道の影響は重大ではないことを示している。

④ A generalized validation procedure for pedestrian models

著者：Liao Weichen、Zhao Ying、Liao Weichen、Zhang Jun、Zhang Jun、Zheng Xiaoping
文献：Simulation Modelling Practice and Theory、Vol.77 Page.20-31、2017

十分に制御された歩行者実験に基づいて、FDS + Evac と JuPedSim という歩行者モデルで2つの検証練習を行っている。モデルの安定性、歩行者の流れ、密度と速度の時系列、時空間プロファイル、歩行者の軌道を含む検証結果の信頼性を向上させるために、複数の特性の包括的な組み合わせが使用されている。結果は、FDS + Evac と JuPedSim の両方が現実的な完全歩行者特性を再現することに弱点を有することを示している。検証作業では、単一の特性だけでは信頼できる検証結果を保証するには不十分であり、複数の特性の包括的な組み合わせが必要であることが示されている。

⑤ A finite element model of a six-year-old child for simulating pedestrian accidents

著者：Meng Yunzhu、Pak Wansoo、Untaroiu Costin D、Guleyupoglu Berkan、Koya Bharath、Gayzik F. Scott

文献：Accident Analysis & Prevention、Vol.98 Page.206-213、2017

最高死亡率に直面した最も脆弱な道路利用者である子供の歩行者保護は、車両の安全性設計においてより注目に値する。そこで（単純化した）六歳（6YO PS）歩行者 FE モデルを開発し、最近発表された小児データに基づいてそれを検証している。一連の小児歩行者の衝突（CPC）は 20km/h から 60km/h までの範囲の衝撃速度でシミュレートしている。全体的に、この研究で開発された 6YO-PS FE モデルは、コンポーネントレベル（下肢および骨盤）での良好な生物忠実度および CPC シミュレーションにおける安定性を示している。

⑥ An Enhanced Simulation Model for Complex Human Pedestrian Movement System using Hybrid Discrete Event and Agent Based Simulation

著者：MAJID Mazlina Abdul、FAKHRELDIN Mohammed、ZAMLI Kamal Z

文献：Information (Koganei)、Vol.19 No.9(B) Page.4213-4218、2016

歩行者行動の高度シミュレーションモデルである、エージェント離散イベント歩行者モデル（AoDEPM）が構築されている。また多様な人間行動のモデル化予測において、ABS および DES の精度問題が解決されたことを示している。

⑦ ポテンシャル場と Social Force モデルを用いた群衆避難行動の検討

著者：牧野嶋文泰、今村文彦、安倍祥

文献：東北地域災害科学研究、Vol.52 Page.223-228、2016

単位希望速度ベクトルをポテンシャル場から算出し、障害物付近での移動に単純な規則を設けることで、ポテンシャル場と Social Force モデルを組み合わせた歩行者モデルを開発し、基礎的な検証を行っている。移動方向に乱数を用いて進行方向に影響しない程度の不確かさを与え、斥力の計算判定に視野の概念を導入したことで、1対1のエージェントの基礎的な回避、追い越し行動の再現が可能となることを示している。

⑧ Comparison and evaluation of pedestrian motion models for vehicle safety systems

著者：Brouwer Nina、Kloeden Horst、Stiller Christoph

文献：IEEE Conference Proceedings、Vol.2016 No.ITSC Page.2207-2212、2016

歩行者運動モデルの性能に及ぼす異なる情報の影響を評価している。このために、動的小および生理学的制約の他に、頭部方向、典型的な歩行者運動と環境情報として追加情報を使用している。これまでの研究は、予測時間によってモデルのパフォーマンスが異なることが示されているが、新しく導入されたシステムは、各モデルの確率マップを融合して、継続的な予測パフォーマンスを達成することが可能である。

⑨ 局所領域の情報からの予測にもとづく歩行者モデル

著者：郷古学、大塚一路

文献：日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌、Vol.58 Page.56-69、2015

行動生成における予測の影響に着目し、予測情報に基づいて意思決定を行う歩行者モデルを構築し、その妥当性を検証している。提案モデルにおいて、各エージェントは周囲の歩行者の情報に基づいて、混雑状況を予測し、自らの進行方向の決定に利用する。実際の歩行者の認知的な負荷を考慮し、エージェントが予測を行う際には、自身の前方の局所領域のみを観測するものとしている。また、観測する情報も他のエージェントの有無という比較的単純な情報に限定している。モデルの構築とともに、対向流シミュレーションにより、提案モデルがレーン現象を再現できることを確認している。また、実際の対向流において報告されている、予測の影響と歩行者の挙動との関係が再現できることが確認できる。

⑩ フロアフィールドを用いた歩行者交差流のシミュレーション

著者：高橋大樹、日永田泰啓、只木進一

文献：交通流のシミュレーションシンポジウム論文集、Vol.17th Page.113-116、2011

地下道などの交差部における歩行者の流れを考えている。直行する方向に移動する歩行者をモデル化するために、フロアフィールドを用いたセルオートマトンモデルを構築している。静的・動的フロアフィールドの強度、歩行者後退確率などが、臨界流入確率、渋滞界面に与える効果についてシミュレーションを通じて検討を行っている。

⑪ 基礎・応用学術研究 交錯交通の容量評価のためのマイクロ歩行者行動モデル

著者：浅野美帆、井料隆雅、桑原雅夫

文献：交通工学、Vol.43 No.4 Page.80-89、2008

歩行者流が複数方向に交錯する状況において交通容量を評価するためのマイクロ行動モデルを提案および検証を行っている。近い将来における周辺歩行者の位置を制約として、所与の希望する方向に対してある時間内にできるだけ長く進むように速度・方向を選択する歩行行動モデルを提案している。基本的なモデルの特性検証や実験データとの比較により、本モデルが交通量や交錯角度の異なる様々な状況について歩行者の回避行動をよく再現していることが示されている。

⑫ Dynamic Cell Transmission-Based Pedestrian Model with Multidirectional Flows and Strategic Route Choices

著者：ASANO Miho、KUWAHARA Masao、TANAKA Shinji、SUMALEE Agachai

文献：Transportation Research Record、No.2039 Page.42-49、2007

戦略的経路選択モデルと多方向フロー伝播を持つダイナミック歩行者モデルのフレームワークを提案している。ここでは、歩行者は最初に一連の区域を選択すると仮定し、次に、モデルはダイナミックユーザー最適の仮定に基づき詳細ルートでの実際のフローを配分する。歩行者フローのダイナミック伝播の物理的現象を表わすために、修正セルトランスミッションモデル（CTM）を採用している。オリジナル CTM との主な違いは、歩行者フローは本来多方向であるということである。ここでは、多方向移動を考慮するために、修正 CTM を提案し、提案の修正 CTM をテストケースで評価している。

⑬ Modeling pedestrians' road crossing behavior in traffic system micro-simulation in China

著者：YANG Jianguo、DENG Wen、WANG Jinmei、LI Qingfeng、WANG Zhaoan

文献：Transp Res Part A Policy Pr、Vol.40 No.3 Page.280-290、2006

中国の交通システム・マイクロ・シミュレーションのための歩行者モデルを紹介している。高い信号無視率を考察することによって、歩行者を法律無視タイプと日和見タイプの二つのタイプに分類し、これら二つのタイプの特性をアンケート調査により決定している。偏差発生の解析に基づいたパラメータ調整によって、シミュレーション結果は、フィールド調査結果と一致することの確認を行っている。

⑭ Microscopic Parameter Identification of Pedestrian Models and Implications for Pedestrian Flow Modeling

著者：HOOGENDOORN Serge P、DAAMEN Winnie

文献：Transp Res Rec、No.1982 Page.57-64、2006

微視的な歩行者モデルのパラメータ評価は集合体としてのモデル成果（通行量、速度、密度など）の比較により検証が行われるが、巨視的な関係（密度カーブなど）の予測、あるいは空間に出現する一時的なパターン（動的なレーン構成、交差点での行動など）に関する検証は交通専門家の見解により行われている。そこで、歩行者の軌跡データを使用した微視的歩行者モデルのキャリブレーションについて考察を行い、微視的なモデル一般、および特に歩行者モデルのパラメータ検証を可能にする一般的方法を提案している。検討結果として、個々の歩行者挙動とともに発生する歩行者交通量特性に関する見識の提供を行っている。

⑮ マルチボディによる歩行者シミュレーション

著者：速水則行、佐久間茂

文献：自動車技術会学術講演会前刷集、No.35-01 Page.1-2、2001

マルチボディによるシミュレーションにより衝撃作用時の歩行者挙動を解析している。シミュレーションモデルは大別して車両モデルと歩行者モデルから構成されている。人体モデルとダミーモデルと挙動の違いは下肢に大きく現れ、衝突速度の増加と共に全身挙動の違いも大きくなることが示されている。また、衝突初期の歩行者の姿勢の違いは、その後の挙動に大きく影響することが示されている。

⑩ MADYMO pedestrian simulations

著者：Van WIJK J、WISMANS J、MALTHA J、WITTEBROOD L

文献：Pedestr Impact Inj Assess、Page.109-117、1983

歩行者モデル 4 体を紹介している。3 体は二次元モデルで各々 2、5 および 7 部分で構成されている。1 体は三次元モデルで、15 部分で構成されている。いずれも汎用衝撃被害シミュレーションパッケージの"MADYMO"に準拠して組立てられており、これらのモデルを用いた実験結果を、P572 ダミーの 30 および 40km/h の横方向衝撃実験結果と比較し、モデルの複雑な構造についてその信頼性を検討している。

⑪ Modelling the evolution of human trail systems

著者：HELBING D、KELTSCH J、MOLNAR P

文献：Nature、Vol.388 No.6637 Page.47-50、1997

歩行経路がどんなトポロジー構造をもつのか、また都市計画に際し、人にとって最適の導線を予想できるのかを知るために、モデル化を行っている。「能動的歩行者モデル」を用いており、歩行者の動きとその方向はもちろん、人を取り巻く環境からのフィールドバック効果も考慮している。広い範囲を見たときに観察される歩行経路の特徴をこのモデルが再現できている。

⑫ Validation of the PC-Crash Pedestrian Model

著者：MOSER A、HOSCHOPF H、STEFFAN H、KASANICKY G

文献：Spec Publ Soc Automot Eng、No.SP-1491 Page.325-349、2000

多体システムをもとに各種のボディがジョイントでつながっている標記のモデルの検証プロセスを詳細に説明している。各ボディに人体各部の特性をもたせることができ、各種の比較により、PC - Crash 歩行者モデルは歩行者の全軌跡に対して良好な推定を与えることが示されている。同一モデルで広範囲の衝突速度をカバーでき、各種の車両運転条件を組み込むことが可能である。PC - Crash 歩行者モデルは、歩行者事故を解析する一般式に比べて使用容易なツールであることを示している。

⑲ Modeling detour behavior of pedestrian dynamics under different conditions

著者 : Qu Yunchao、Wu Jianjun、Tang Tao、Gao Ziyou、Xiao Yao、Wu Jianjun、Gao Ziyou
文献 : Physica A. Statistical Mechanics and Its Applications、Vol.492 Page.1153-1167、2018

Voronoi 図によって統合された Social Force Model を迂回方向と優先速度を計算するために提案している。それに加えて、隣接歩行者の位置と速度を考慮した、ロジットベース選択モデルを、迂回方向選択を記述するために構築している。提案したモデルは、単方向または双方向の流れと廊下シナリオにおける歩行者動力学、および実世界の建築シナリオを解析した。シミュレーション結果は迂回行動を含む修正ソーシャルフォースモデルは、衝突とデッドロックの頻度を減少させる、群衆の平均速度を増加させ、迂回行動をより実用的な群衆動力学を予測することができたことを示している。

⑳ A modeling of pedestrian dynamics regarding the effect of walking characteristics

著者 : Ota Kazuki、Kojima Akira
文献 : IEEE Conference Proceedings、Vol.2017 No.SICE Page.1363-1367、2017

歩行者流のシミュレーションモデルを混合論理的 (MLD) システムアプローチに基づいて提案し、さらに回避領域制約の方向変化の計算アルゴリズムを紹介している。提案したモデルに基づいて、シミュレーション結果は、歩行者流れ係数の観点から検討を行っている。

㉑ The Hughes model for pedestrian dynamics and congestion modelling

著者 : Carlini Elisabetta、Festa Adriano
文献 : IFAC PapersOnLine、Vol.50 No.1 Page.1655-1660、2017

異なるタイプの混雑効果の下での歩行者流のための Hughes モデルのいくつかの変化の数値的研究を提示している。PDE 系の解を近似するために効率的な半 Lagrange 型スキーム (SL) を提案し、渋滞現象をモデル化する異なるペナルティ関数の巨視的効果を調べている。

㉓ The effects of mobile phone use on pedestrian crossing behavior and safety at unsignalized intersections

著者：Zhang Hualong、Zhang Cunbao、Wei Yuanyuan、Chen Feng

文献：IEEE Conference Proceedings、Vol.2017 No.ICTIS Page.280-285、2017

歩行者の行動や安全性に、携帯電話の使用（話す、画面を見たり、音楽を聴くなど）がどのように影響するかを調査している。歩行者の安全性を定量的に分析するために、携帯電話の使い方、個人の特性、交通量などの変数が含まれたロジスティック回帰モデルを構築し、結果は、信号のない交差点を横切って携帯電話を使用する歩行者は、携帯電話を使用しない歩行者よりも事故リスクが高いことを示している。

㉔ Simulation of pedestrian behaviors based on an improved floor field cellular automaton model under attractive incidents

著者：Min Zhao、Linglin Wang、Dihua Sun、Linjiang Zheng

文献：IEEE Conference Proceedings、Vol.2017 No.CCDC Page.3602-3607、2017

誘因的な事故下での歩行者挙動をシミュレートし、再現するために、改良されたフロアフィールドを提案している。この改良されたモデルは、静的フロアフィールド、動的フロアフィールドと新しく提案した魅力的な場、入射の魅力的な程度、傍観者の視点距離、歩行者の安全な心理的距離を考慮に入れ構成されている。歩行者の遷移確率は静的床場、動的床場と魅力的な場の相互作用により決定される。それに加えて、歩行者移動状態は魅力的な事故:歩行、滞在、および脱離、収集の歩行者挙動を表現できる鏡と散逸の存在下での三種類に分けられている。提案したモデルは onlooking 過程を再現し、魅力的な事故発生時の円環状現象の典型的な特徴を捉えることができることを示している。

㉕ Centroid based pose ratio for pedestrian action recognition

著者：Hariyono Joko、Kang-Hyun Jo

文献：IEEE Conference Proceedings、Vol.2016 No.ISIE Page.895-900、2016

歩行者行動認識のための重心ベース姿勢比を提案することにより人間の歩行のユニークな姿勢を調べている。提案したモデルは行動分類を行う歩行者の横方向速度、歩行方向と空間レイアウト環境の姿勢比を組み込んでいる。歩行者の横方向速度は基底面上に検出されたヒトの重心の投影点上の点追跡を用いて決定し、物体の歩行方向は連続フレームを用いて推定している。

㉓ 横断歩道長と歩行者信号現示を考慮した横断歩行速度のモデル化

著者：張馨、中村英樹、井料(浅野)美帆、陳鵬

文献：土木学会論文集 D3、Vol.70 No.5 Page.I.1031-I.1040 (J-STAGE)、2014

様々な横断歩道長や歩行者青時間長の横断歩道における歩行者青 (PG) 時の横断歩行速度を、横断の前半・後半に分けて分析し、これらを推定するモデルの構築を行っている。これを既存の歩行者青点滅 (PF) 時間を対象としたモデルと比較し各説明変数の感度分析を行ったところ、青点滅時の方が、全体的に横断歩行速度が速く、横断歩道長や横断開始タイミングに対する感度も高い傾向が見られている。

㉔ Analysis and Modeling of Pedestrian Crossing Behavior During the Pedestrian Flashing Green Interval

著者：IRYO - ASANO Miho、ALHAJYASEEN Wael K.M.、NAKAMURA Hideki

文献：IEEE Transact Int Trans Intell Transp Syst、Vol.16 No.2 Page.958-969、2015

横断歩道における歩行者にとっての安全な区間である歩行者流動青色信号 (PEG) 中の、歩行者横断挙動に関する解析およびモデリング手法を提案している。実験的解析を行い、歩行者の停止 - 進行意思決定、速度分布について論じ、モデル推定実験の結果を示している。その結果の検証を行い、その中で、モンテカルロシミュレーション、推定された速度分布の検証、速度分布モデルの感度解析などの結果を示している。

㉕ 信号機付横断歩道での歩行者流れの微視的シミュレーションモデル

著者：REN Gang、LU Lili、WANG Wei、GONG Xiaolin、HUANG Zhengfeng

文献：Transp Res Rec、No.2434 Page.113-122、2014

横断歩道上で対向する歩行者と横断歩道境界からの反発力を考慮した歩行モデルを作成し、計算機シミュレーションと実際の観測データの比較から、その有効性の検証を行っている。シミュレーション結果と実際の交差点での観察結果による平均横断速度の間には、決定係数で 0.71 という高い相関が認められている。

㉘ An Agent-Based Microscopic Pedestrian Flow Simulation Model for Pedestrian Traffic Problems

著者：LIU Shaobo、LO Siuming、WANG Weili、MA Jian

文献：IEEE Transact Int Trans Intell Transp Syst、Vol.15 No.3 Page.992-1001、2014

歩行者のための安全性、効率性、快適性を保証した交通システムの提案を目的として、歩行者交通問題のためのエージェントに基づく微視的歩行者流のシミュレーションモデルを提示している。パラメータの感度解析を行い、障害物との相互作用、その他の歩行者との相互作用、視野角離散化解像度の影響について論じ、歩行者行動のモデリングに関しては、速度および密度の関係、隘路における流速の速度、双方向流における車線形成などについて論じている。

㉙ Modeling Pedestrian Crossing Paths at Unmarked Roadways

著者：ZHUANG Xiangling、WU Changxu

文献：IEEE Transact Int Trans Intell Transp Syst、Vol.14 No.3 Page.1438-1448、2013

歩行者の行動を理解し安全性を促進することを目的として、標識の無い自動車道路での歩行者横断経路のモデリングを行っている。歩行者経路のモデリングに関しては、そのフレームワークを提示するとともに、認識されたリスク、距離の狂いについて議論を行い、その中で、位置に基づくリスク知覚の例を示している。モデルの継承のための評価実験を行い、提案モデルの有効性を確認している。

㊀ ドライブレコーダを用いた横断歩道外の歩行者行動分析とモデル化の検討

著者：森博子、小里明男、山下真彦、倉橋哲郎、町田貴史、北岡広宣、朝倉康夫

文献：自動車技術会論文集、Vol.41 No.4 Page.915-920、2010

横断歩道外の事故の要因および傾向を把握するために、ドライバーが歩行者に対してヒヤリハットを起こした時の、画像に写った歩行者の行動や状況から、歩行者の事故要因を推定、分析する方法について検討を行っている。画像にもとづいて歩行者の行動を分析した結果、車両は来ないだろうという予測や歩行者優先をドライバーへ期待する意識に起因する歩行者の判断エラーが多いことを報告している。

⑩ Modeling Fault in Fatal Pedestrian Crashes by Using Various Data Sources

著者：SPAINHOUR Lisa K、WOOTTON Isaac A.

文献：Transp Res Rec、No.2002 Page.64-71、2007

歩行者とドライバそれぞれの、過失発生確率を求める3種のモデルを誘導している。モデルの分析により、歩行者、ドライバとも心理状態が過失発生に影響し易いこと、横断車線数・年齢・車から降りた歩行者等も過失発生に係わり易い要素であること等が明らかになっている。

⑪ Modeling Crossing Behavior and Accident Risk of Pedestrians

著者：YANNIS George、GOLIAS John、PAPADIMITRIOU Eleonora

文献：J Transp Eng、Vol.133 No.11 Page.634-644、2007

都市における安全性解析の一環として標題のモデルを開発している。交差点を選ぶか、街区中間の横断歩道を選ぶかを第1段階の選択とし、どの位置にある横断歩道を選ぶかを第2段階の選択する、ネステッド・ロジット・モデルと、線形回帰モデルを組み合わせたモデルを導いている。さらにこれに、起点からの距離の関数として、トリップ中の横断行動発生確率を表すモデルを組み合わせ、横断行動モデルの開発を行っている。

5.3 対外発表報告

発表日	発表先	発表タイトル	発表概要	発表者
17.11.15	SIP-adus WorkShop	SIP-adus Project: Development of traffic accident simulation to evaluate safety benefits of ADAS/ADS	高度運転支援/自動走行 システムの導入による交 通事故数の削減効果を評 価するための交通環境再 現型シミュレーションの 開発について報告する。 複数の交差点が連続する 環境を再現し、追突事故 低減に有効なシステムの 効果を定量化できること について紹介した。	内田 信行 安全研究部
17.12.5	日本機械 学会第 26 回交通・物 流部門大 会	自動走行システムによ る事故低減詳細効果を 評価するためのシミュ レーション技術の開発 —ドライバ行動モデル 構築のためのドライバ 属性と運転行動の関係 の分析—	自動走行システムによる 事故低減効果をシミュ レーションによって定量化 するため、ドライバ属性 の違いによる運転行動へ の影響を把握するための 実車走行実験を行った。 実験により得られた安全 性に関わる個人特性を表 現するための有用な知見 について報告した。	北島 創 安全研究部
17.12.6	日本機械 学会第 26 回交通・物 流部門大 会	実験による歩行者の横 断歩道外道路横断行動 の計測と分析	本研究では、予防安全評 価シミュレーションに用 いる歩行者モデルを構築 することが目的である。 パラメータ間の相関や年 齢等の属性を考慮したパ ラメータを確率や分布が 実装された歩行者モデル を開発するため、条件を 統制した実験によって、 歩行者の横断歩道外の横 断行動特性に関して得ら れた知見を報告した。	中村 翔輝 東京理科大 学

5.4 まとめ

自動走行機能により社会が受ける影響の評価は各国でも高い関心を寄せており、これを議論するツールとしてシミュレーション技術に期待するところは大きいと見られる。シミュレーションの開発には実態を調査することが必要であり、先行研究の知見はその参考となる。この2点からは、今回得られた調査の知見は、シミュレーションの応用先と技術開発の両方に資するものであるといえる。

参考文献

5-1) AdaptIVe, D1.0 Final Project Results,

https://www.adaptive-ip.eu/index.php/deliverables_papers.html, 2017

5-2) AdaptIVe, D.7.3 Impact Analysis for Supervised Automated Driving Applications,

https://www.adaptive-ip.eu/index.php/deliverables_papers.html, 2017

5-3) L3PILOT, <http://www.l3pilot.eu/>,2017

第6章 研究開発全体企画・管理

6.1 全体工程表の策定

本事業期間内での研究開発の進捗管理を行う全体工程表をとりまとめ、関連部署間の進捗管理を実施した。

全体工程表として研究受託から年度末までの平成29年度詳細スケジュールを作成した。図6.1-1に本事業の詳細スケジュールを示す。

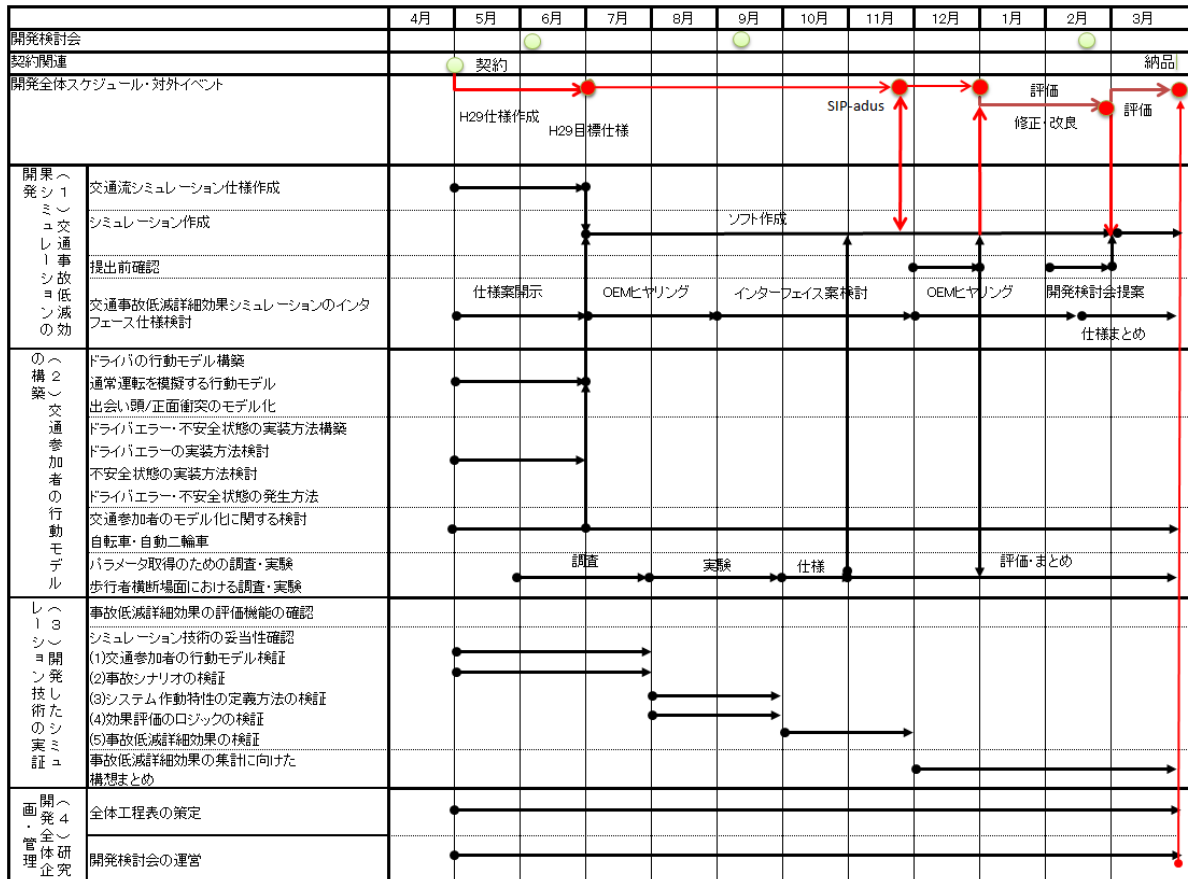


図 6.1-1 「SIP 交通事故低減詳細効果見積りのためのシミュレーション技術の開発及び実証」
詳細スケジュール

6.2 開発検討会の運営

シミュレーション技術の開発は一般財団法人日本自動車研究所がテーマの開発統括および全体企画を行い、全体企画に基づいて日本自動車研究所と東京理科大学が各研究項目を分担して開発を行う。図 6.2-1 にシミュレーション技術の開発体制を示す。

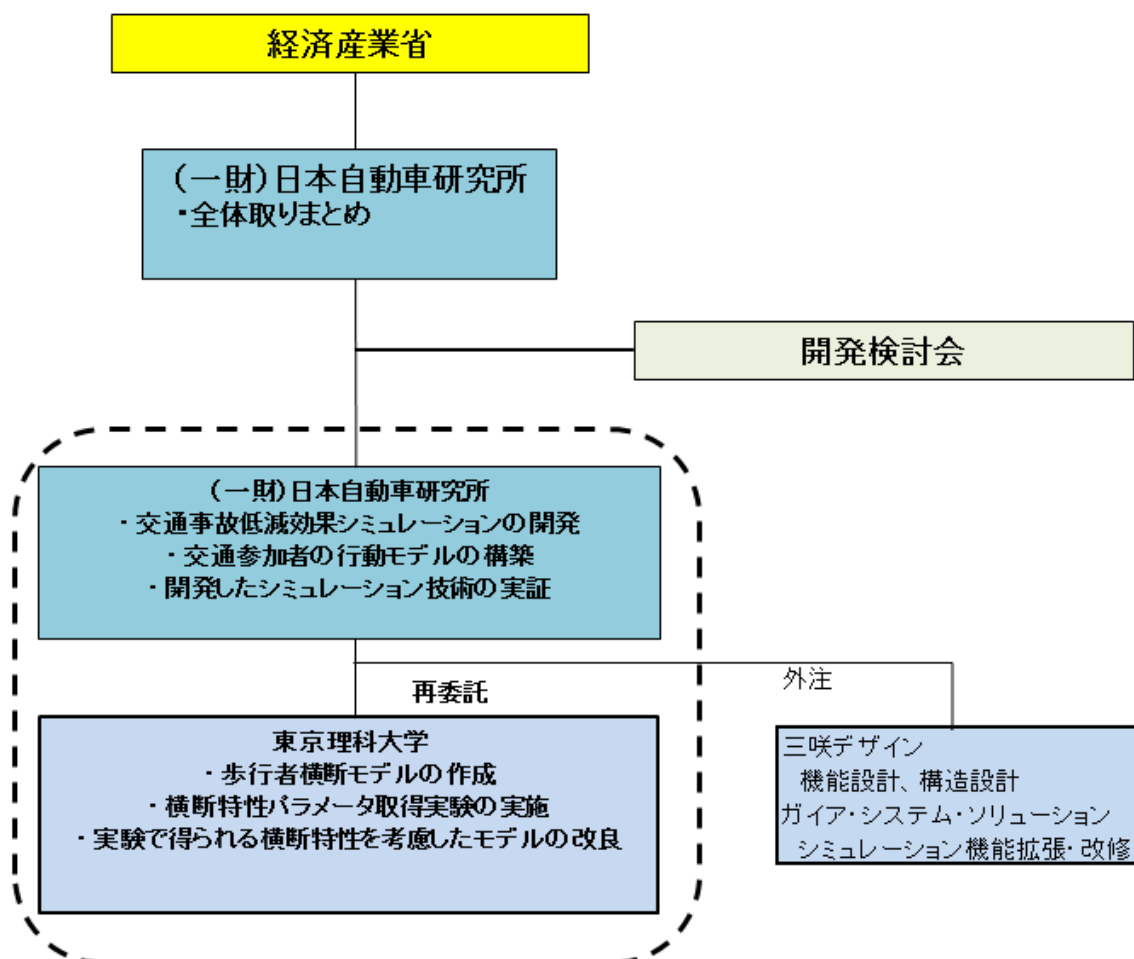


図 6.2-1 「SIP 交通事故低減詳細効果見積りのためのシミュレーション技術の開発及び実証」
開発体制

6.2.1 項に開発検討会の委員名簿を、6.2.2 項に平成 29 年度実施した開発検討会の概要を示す。

6.2.1 開発検討会 委員名簿

本事業の技術開発方針の策定に際して、大学・自動車メーカー等参加による意見交換やアドバイスを頂く場として開発検討会を開催した。委員名簿を表 6.2.1-1 に示す。

表 6.2.1-1 開発検討会 委員名簿

	氏名	組織名	所属／役職
座長	伊藤 誠	国立大学法人 筑波大学	システム情報系(情報工学域)教授
委員	金光 寛幸	SIP-Adus	システム実用化WG 構成員
委員	大門 樹	学校法人 慶應義塾	理工学部 管理工学科 教授
委員	武田 一哉	国立大学法人 名古屋大学	大学院情報学研究科 知能システム学専攻 教授
委員	鳥井 豊隆	株式会社 本田技術研究所	R&DセンターX OIプロジェクト 主任研究員
委員	福庭 一志	マツダ株式会社	車両技術開発本部 人間機械システム研究 アシスタントマネージャー
委員	佐久川 純	トヨタ自動車 株式会社	東富士研究所 先進安全先行開発部 第2先行開発室 室長
委員	伊藤 政義	三菱自動車工業 株式会社	車両技術開発本部 ADAS&コミュニケーション開発部 担当部長(予防安全)
委員	磯野 洸	スズキ株式会社	開発本部 横浜研究所 第一課
委員	赤松 博道	日産自動車 株式会社	統合CAE・PLM部 シニアエンジニア
委員	高澤 厚芳	株式会社SUBARU	スバル技術本部 車両研究実験第4部 車両研究実験第1課 課長

6.2.2 開発検討会

事業実施期間中に開発検討会を3回開催した。交通事故低減詳細効果シミュレーションを実現するために必要な仕様や重要な課題に対する検討を実施した。

第1回（平成29年7月6日）：平成28年度成果および平成29年度計画説明

第2回（平成29年10月25日）：平成29年度進捗報告

第3回（平成30年2月7日）：平成29年度成果報告

(1) 第1回 開発検討会 議事録

開催日時 2017年7月6日 10時00分～12時15分

開催場所 日本自動車会館 くるまプラザ 1階第2会議室

主な議事内容

- ・平成29年度に実施する事業計画を報告して、研究の方向性に関して審議頂いた。
- ・最終成果としての仕上がりのイメージを具体化し、そのイメージに従って着実に取り組むこと。
- ・本事業で織り込む事故シーン、モデル、環境、システムなどの前提条件を明確すると同時に、そのように判断した根拠を明確に説明できるようにまとめておくこと。
- ・低減結果の妥当性検証においては、最終アウトプットを現実に合わせ込むためにパラメータチューニングだけに頼るのではなく、ステップ毎にその根拠を明確にし、検証を行うこと。

(2) 第2回 開発検討会 議事録

開催日時 2017年10月25日 13時00分～15時00分

開催場所 日本自動車会館 くるまプラザ 1階第3会議室

主な議事内容

- ・年度中間報告として進捗や課題を説明し、技術内容と研究の方向性に関し審議頂いた。
- ・交通環境再現型のシミュレーションが必要な理由（事故場面特化型でできないこと）を分かり易く説明できる内容を検討しておくこと。
- ・本事業内で実施対象となる項目とならない項目の関係と、対象に選定した理由を対外的に説明できるようにしておくこと。
- ・最終成果を念頭におき、どのようなプロセスで低減効果を定量的に算出すべきかを明確にすること。

(3) 第3回 開発検討会 議事録

開催日時 2018年2月7日 15時00分～17時15分

開催場所 芝公園フロントタワー 2階 E会議室

主な議事内容

- ・年度最終報告として年度成果を説明し、成果内容と今後の方向性に関し審議頂いた。
- ・最終的に本事業で開発するシミュレーションにはどのような機能があり、何ができるのか

製品カタログやパンフレットのように分かり易くまとめること。

・現実の長い時間（年単位）を短時間で結果を出すことができるのがシミュレーションの大きなメリットなので、時間軸の加速方法やその妥当性について検討すること。

第7章 まとめ

7.1 成果まとめ

交通事故低減詳細効果シミュレーションの開発においては、平成28年度までに開発した3つの事故場面再現技術（追従・追突、車線逸脱、歩行者横断）に、新たな事故場面（正面衝突と出会い頭）を追加し、それらを統合した「交通環境再現型」シミュレーションの開発の目途付けを行った。また、現実の交通現象をより忠実に再現するために、ドライバや歩行者などの交通参加者が、それぞれ知覚・認知・判断・操作の一連の行動を自律的に実施する主体（エージェント）となり、相互の行動に影響し合うマルチエージェントの機能を織り込んだ。

交通参加者の行動モデルの構築においては、現実の事故を忠実に再現させるために、ドライバ運転行動と歩行者行動の模擬を行う機能の整理と性能向上を図った。ドライバのエラー・不安全行動については、知覚・認知・判断・操作と短期記憶の処理中に誤った情報を用いることや処理を省略することでモデルを構築した。また、歩行者モデルの横断特性については、被験者を募って実験を行い、年齢や性別によるパラメータ間の相関を織り込むことができた。

開発したシミュレーション技術の実証については、開発したシミュレーションのドライバや歩行者エージェントが通常の行動から危険な行動までを模擬できていることを確認した。今回はつくば市を対象とした6[km]×3[km]の範囲でシミュレーションを実施し、各エージェントの行動の組み合わせによって追突・車線逸脱・正面衝突・出会い頭・歩行者横断の事故が発生することを確認した。さらに、すべて手動走行のシナリオに加えて、様々な自動走行システムが実用化され普及率が段階的に増えていくそれぞれのシナリオで事故低減効果を算出し、定量的な比較や事故発生地点の比較などが可能になることを確認した。また、シミュレーションで得られた結果が妥当であるかを確認するための検証フローについて検討を行った。

7.2 今後の課題

全国規模の地図・交通流をシミュレーションの対象とすることはできないため、事故低減効果を推計するためには代表的なモデル地域を対象とした結果をベースに全国規模に換算していくことが現実的な推計手法と考えられる。本事業において最終的な推計結果を得るためには、事故実態の特徴に基づく代表モデル地域の選定、選定された代表モデル地域がシミュレーションによって現実的な交通流が再現されているかの確認、手動走行シナリオで発生した事故類型別の事故件数・発生地点の特徴が現実に対応しているかの確認が必要である。そのためには国勢調査、道路交通センサス、交通事故統計などの各種データを活用して妥当性を確認し、その上で最終的に全国規模へ事故低減効果を換算する手法を考案する。

— 禁無断転載 —

経済産業省委託

平成 29 年度
戦略的イノベーション創造プログラム
(自動走行システム) :
交通事故低減詳細効果見積もりのための
シミュレーション技術の開発及び実証

調査報告書

平成 30 年 3 月

発行 一般財団法人日本自動車研究所
東京都港区芝大門 1-1-30
日本自動車会館 12 階
TEL 03 (5733) 7925