

自動運転の安全性評価フレームワーク

Ver4.0

一般社団法人 日本自動車工業会
自動運転部会 AD 安全性評価分科会

2025 年 12 月

目次

1. Introduction	2
1.1. 背景と狙い	2
1.2. 自動運転の安全原則	2
1.3. 安全性評価の範囲	4
1.4. 既存のアプローチの課題整理	6
2. 用語と定義	9
3. 自動運転システム安全論証構造 (Safety argumentation structure)	12
3.1. シナリオベースの安全保証プロセス	12
3.2. シナリオ体系の概要	17
3.3. 安全性の判定方法の考え方	18
3.4. 各外乱シナリオの分類と要因	22
4. シナリオデータベース	83
4.1. 3つのシナリオ抽象化レイヤ	83
4.2. シナリオデータベースのコンセプト	83
4.3. 標準化シナリオに基づく AD 安全性評価のための情報フローのスキーム	84
4.4. テストシナリオデータベースのインタフェース仕様	84
5. 合理的に予見可能な範囲 (Reasonably foreseeable) の詳細	86
5.1. 実交通データに基づく合理的に予見可能な Logical scenario の概要	86
5.2. 国内自動車専用道路におけるカットインシナリオ (No.4) の Logical scenario 定義	86
6. 安全性の判定方法 (Preventable) の詳細	89
6.1. C&C Driver を定義する考え方	89
6.2. C&C Driver のパフォーマンスの定義方法	91
6.3. Responder の安全要件を検証する C&C Driver の具体例	94
6.4. C&C Driver を用いた防止可能性の境界の算出	100
委員表	103
Annex A 道路形状	104
A.1 道路形状構成要素	105
A.2 道路形状基本パラメータ	106
A.3 実環境データによる更新	107
A.4 実世界地図データによる道路形状パラメータ更新	107
Annex B 二輪車特有のシナリオ	109
B.1 周囲の二輪車特有の位置と動作の分類	109
Annex C 交通外乱の複雑なシナリオへのアプローチ	110
C.1 回避行動シナリオの概念	110
C.2 交通流シナリオ	110
C.2.1 回避トリガ	111
C.2.2 回避領域	111
C.2.3 回避領域へのカットイン車両	113
C.2.4 道路環境	113
Annex D 事故データに基づく交通流外乱シナリオ体系の網羅性検証	115
D.1 ドイツ事故調査 (German In-Depth Accident Study: GIDAS) データ	115

D.2 クラッシュ回避研究(NHTSA)のためのプリクラッシュシナリオ類型	116
D.3 交通事故分析センター(ITARDA)データ	117
D.4 網羅性検証結果	118
D.4.1 一般車両の交通外乱シナリオの網羅性	118
D.4.2 交通弱者(自転車)の交通外乱シナリオの網羅性	119
D.4.3 交通弱者(歩行者)の交通外乱シナリオの網羅性	119
Annex E 認識外乱の原理モデルと評価シナリオ	121
E.1 原理モデル記述と評価シナリオ導出のプロセス	121
E.2 ミリ波レーダの原理モデルと評価シナリオ	122
E.2.1【ミリ波レーダ】信号(S)強度差大(認識対象物)	122
E.2.2【ミリ波レーダ】低D/U(路面マルチパス)	128
E.2.3【ミリ波レーダ】低D/U(方位角変化)	132
E.2.4【ミリ波レーダ】低S/N(車両の向き)	138
E.2.5【ミリ波レーダ】低D/U(構造物)	141
E.3 LiDARの原理モデルと評価シナリオ	145
E.3.1【LiDAR】信号減衰(認識対象物)	145
E.3.2【LiDAR】ノイズ	153
E.3.3【LiDAR】認識対象外からの信号(雨滴での反射)	160
E.4 カメラの原理モデルと評価シナリオ	167
E.4.1【カメラ】遮蔽(見切れ)	167
E.4.2【カメラ】空間周波数低下・コントラスト低下(空間障害物)	177
E.4.3【カメラ】飽和(過多)、白飛び	189
Annex F(参考) 認識外乱評価用仮想環境の妥当性確認ガイドライン	199
F.1 本 Annex で定義する要件の全体像	200
F.2 共通要件と妥当性確認方法	201
F.2.1 共通要件の考え方	201
F.2.2 各センサにおける共通要件の考え方	202
F.2.3 共通要件の妥当性確認方法	210
F.3 認識外乱再現要件と妥当性確認方法	260
F.3.1 認識外乱再現要件の考え方	260
F.3.2 各センサにおける認識外乱再現要件の考え方	260
F.3.3 認識外乱再現要件の妥当性確認方法	266
Annex G 協定規則第 157 号に係るシミュレーションツールの妥当性確認およびシミュレーション試験方法	299
G.1 目的、対象範囲	299
G.2 用語定義	299
G.3 シミュレーションツールの妥当性確認方法	300
G.4 シミュレーションツールの妥当性確認手順	302
G.5 ADS 安全性能評価シミュレーション方法	303
G.6 提出書類	310

改訂履歴

Ver.	発行日	改訂内容
Ver.1	2020 年 10 月	初版発行
Ver.2	2021 年 12 月	Annex の追加 <ul style="list-style-type: none"> Annex E 認識外乱の原理モデルと評価シナリオ Annex F (参考) 認識外乱評価用仮想環境の妥当性ガイドライン Annex G 協定規則第 157 号に係るシミュレーションツールの妥当性確認及びシミュレーション試験方法
Ver.3	2022 年 12 月	<ul style="list-style-type: none"> 交通外乱シナリオに関する改訂 自動車専用道路に限定した内容から一般道も対象とした内容に変更し、一般道も含めた一般車両の交通外乱シナリオを追加及び Annex D に ITARDA データを追加 認識外乱シナリオに関する改訂 Annex E,F の内容追加 車両運動外乱シナリオに関する改訂 一般道の Preventability/Unpreventability 境界条件を追加
Ver.4	2025 年 12 月	<ul style="list-style-type: none"> 構成の見直し 用語定義の追加 各章の追記・修正(以下主な項目) <ul style="list-style-type: none"> 交通弱者(自転車)シナリオの考え方を追記 交通弱者(歩行者)シナリオの追加 認識外乱シナリオの死角シナリオに一般道の考え方を追記 Annex D に交通弱者(自転車、歩行者)の網羅性確認を追加 Annex E,F の文書構成変更及び説明を追加

1. Introduction

1.1. 背景と狙い

近年、より安全で効率的、かつ自由なモビリティ社会の実現に向けて、自動運転車両の実用化と普及が期待されている。しかし、自動運転車が十分な安全性能を備えていることの確認は、制度的および技術的な観点の両面から、世界的にも極めて大きな課題である。

こうした背景を踏まえ、日本自動車工業会として、論理的な網羅性・実行性・透明性を確保することを目的とした、自動運転に関する安全論証体系・安全性評価手法・安全性判断手法の最適解を本稿にまとめた。

なお自動運転技術の実用化やその成熟度の進展に伴い、これらの安全性評価・判断技術も改訂が必要になる可能性があり、本稿の内容についても、今後の技術進展や社会状況の変化に応じて、随時内容の見直し・更新を行う。

【狙い】

- ①開発プロセスの企画・設計・評価の各段階において、本稿を安全性の評価・検証する際のガイドラインとすることにより、安全性・開発効率の向上を可能とする
- ②国際基準・標準の策定に向けた技術的な共通理解を得る
- ③国内外の各プロジェクトと連携推進する際の日本自動車工業会の考え方を明確にする

1.2. 自動運転の安全原則

国際的な自動車基準調和を行う UN/WP29 は、自動運転車両に関する安全原則(safety vision)を以下のよう

“Automated vehicles shall not cause any non-tolerable risk, meaning that, under their operational domain, shall not cause any traffic accidents resulting in injury or death that are reasonably foreseeable and preventable “(自動運転車両は、その運転領域(OD)において、合理的に予見可能かつ防止可能な交通事故を発生させてはならない。)

(出典: UN/WP29, 2019, WP29-177-19, Framework document on automated/autonomous vehicles)

この定義の合理的予見可能性(Foreseeability)と防止可能性(Preventability)はそれぞれ独立した軸と考えることができる。したがって、自動運転車両が遭遇する場面は合理的に予見可能であるかどうか、事故を防止可能であるかどうかを組み合わせた四象限に分類することができる(図 1 A,B,C,D)。

各象限で要求される安全性担保の考え方について示す。

A. 予見可能かつ防止可能な事象(Foreseeable/Preventable)

この領域に含まれる事象は、安全原則上、すべて回避されなければならない。したがって、本象限に属する事故の発生は、システムの安全性欠如を意味する。

B. 予見可能だが防止不可能な事象(Foreseeable/Unpreventable)

本象限に属する事象は、技術的限界や物理的制約により回避が不可能である。したがって、システムの対応は回避ではなく被害低減に重点が置かれる。

C. 予見不可能だが防止可能な事象(Unforeseeable/Preventable)

本領域に分類される事象は、現時点では予測困難であるものの、自動運転システムの改良や改善を通じて将来的に対応可能となるべき範疇に含まれる。従って、システム改善のための知見として収集・活用されるべきである。

D. 予見も防止も不可能な事象(Unforeseeable/Unpreventable)

本領域に分類される事象は、システムの対応が不可能であり、社会的には保険制度等のセーフティネットによって処理されるべき領域である。

以上のように、UN/WP29 が定める安全原則は、自動運転車両における安全性担保の基本的な評価枠組みを規定するものであり、各象限の整理はシステム設計および政策決定の基盤を形成する。

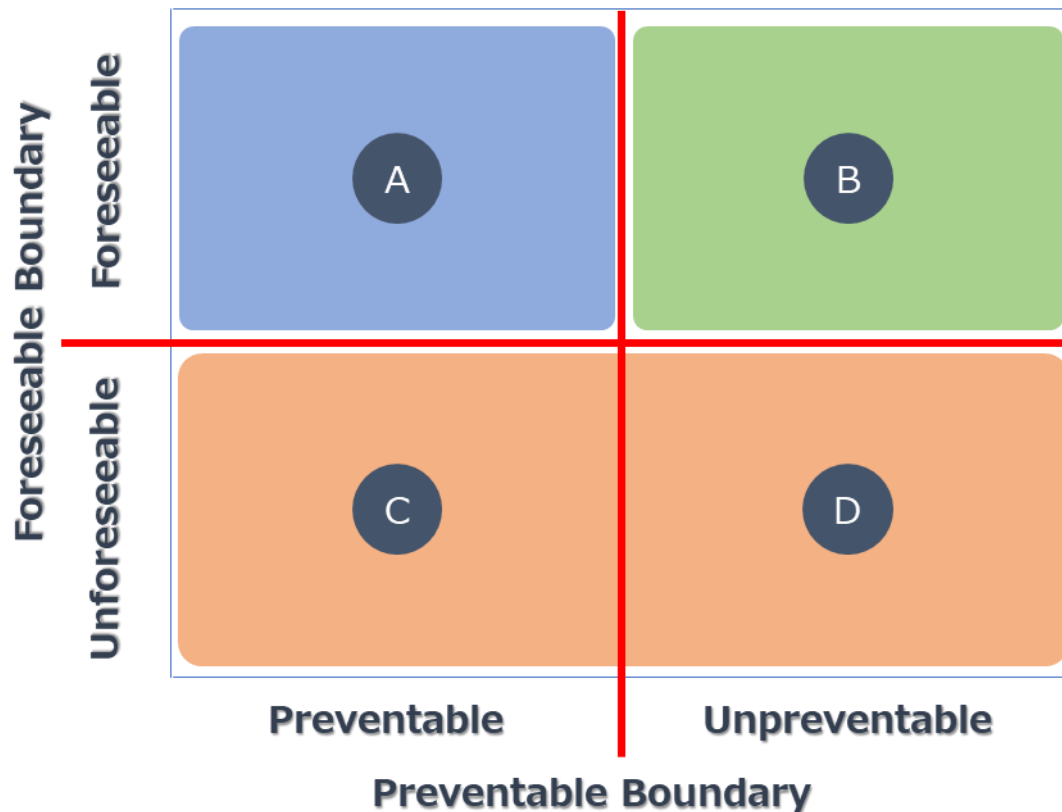


図 1. 予見可能性と防止可能性の相互関係

1.3. 安全性評価のスコープ

WP29 が提示するフレームワークドキュメントにおいて、自動運転システムの安全性に関する要素 (Safety Aspects) が示されている。これら自動運転システムの安全性に関する要素は図 2 に示す通り階層的に整理することができる。本枠組みに従うと、本稿において対象とする領域は、その中でも「validation for system safety」に相当する部分である。

(出典: UN/WP29, 2019, WP29-177-19, Framework document on automated/autonomous vehicles)

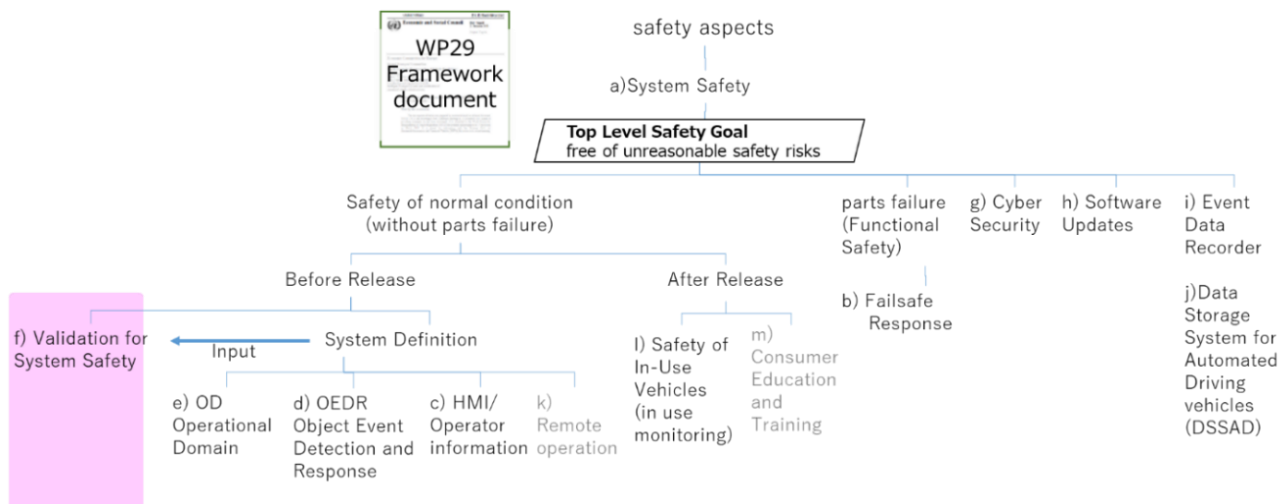


図 2. Safety Aspects の階層図

さらに、この「validation for system safety」を WP29 の safety vision に基づき分解すると、図 3 に示すような構造に整理される。1.2 章で示した自動運転車両に関する安全原則 (safety vision) を Safety Goal とし、合理的予見可能性 (Foreseeability) と防止可能性 (Preventability) の観点で分類した 4 つの象限で検証の範囲を層別する。B、C、D の象限は、いずれも偶発的な事象であり、Best Effort での対応となることから、評価対象としない。一方、A 象限は合理的に予見可能かつ防止可能な事象であるため評価対象となる。A 象限はさらに、「A-2 通常状況」(例: 車線内を単独で走行する、道路交通法を遵守するなどの機能評価)と、外乱などが発生している通常ではない状況での安全性を評価する「A-1 トリガ状況」(リスクが発生しようとしている状況)に層別され、いずれも評価の対象となる。

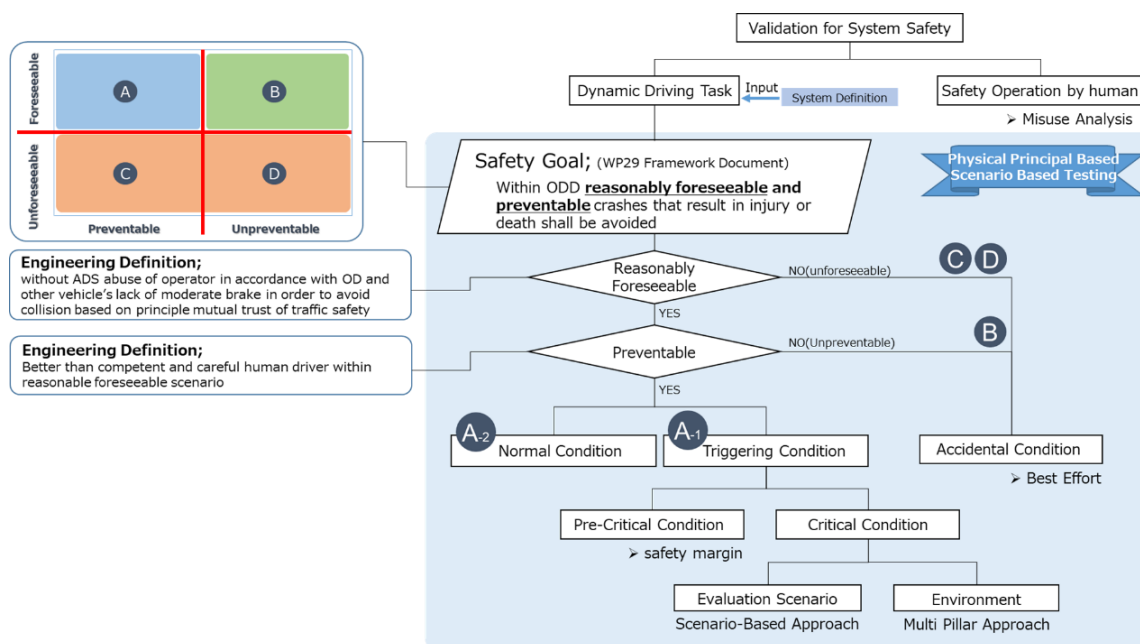


図 3. 安全論証構造図

ここで、動的運転タスク(Dynamic Driving Task:DDT)中に自動運転システムが遭遇する状況を、リスクの度合いに基づいて整理すると、図 4 のように分類した ①リスクが全く存在しない通常の運転状態(Normal Condition)、②要因が存在するが直ちにハザードに至らない潜在的なリスク状態(Pre-critical Condition)、③リスクが顕在化しシステムの動的運転タスクに直接影響を及ぼす状態(Critical Condition)、④システムが適切に対処できず事故の回避が不可能な状態(Unavoidable Condition)

つまり、特定のハザード(事故)に至るプロセスは、リスクのない通常運転状態から Pre-critical Condition、Critical Condition へと段階的に遷移し、システムが適切に対処できなかった場合、Unavoidable Condition に至る。

本稿では、OEDR(Object and Event Detection and Response)に直接影響を及ぼす「Critical Condition」の発生をトリガ条件と定義し、安全性評価のスコープとする。

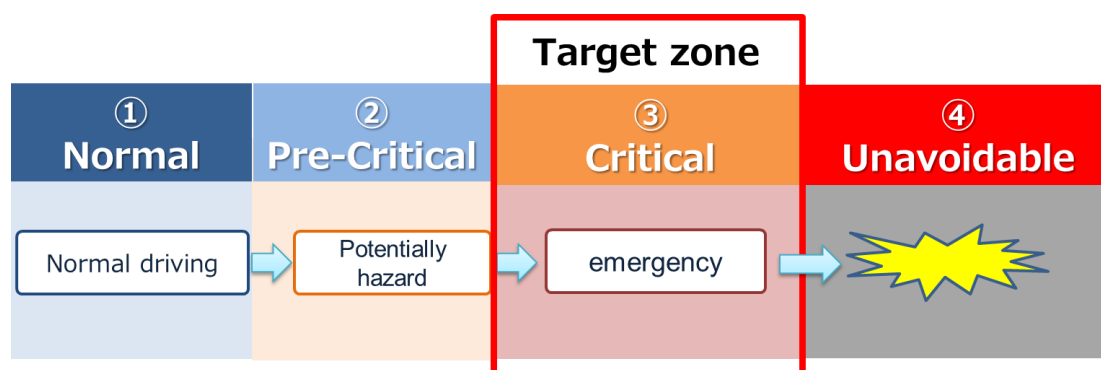


図 4 安全性評価スコープ

なお「Pre-critical condition」については、予測設計であるため競争領域と考え一律の評価は望ましくない。例えば、前走車が落下しそうな貨物を積載している状況などが該当する。この段階では衝突へ至るか否かが確定していないため、画一的なシナリオを設定し、評価基準を定めることは適切でない。

1.4. 既存のアプローチの課題整理

1.4.1. 長距離・長時間試験評価による安全性の保証

特定の自動運転システムの安全性を保証する手法として、対象とするシステムの OD 内で長距離・長時間の走行を実施し、リスクに遭遇する頻度から評価する手法が一般的に知られている(参照: *Kalra, N. et al.: Driving to Safety: How Many Miles of Driving Would It Take to Demonstrate Autonomous Vehicle Reliability? Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2016*)。通常、評価対象となる自動運転システムにセーフティドライバが同乗し、OD 内でどの程度の頻度の介入(オーバーライド)が発生したかを確率的に説明することになる。ある試算によると、この手法で任意の自動運転システムの安全性を 95%の有意性で保証するためには 110 億マイル(約 177 億 km)の走行が必要であるとされ、別のシステム(あるいは仕様が変更されたシステム)の安全性を保証するためには、そのシステムの OD 内で新たに長距離走行を実施する必要がある。

実交通環境で長距離・長時間の試験評価を通じて改善を繰り返していくことで一定以上の確率的な信頼性を保証する開発プロセスは性能向上としては有効であるものの、評価結果は機密情報で開発会社・プロジェクトから公表されず、審査当局が監査を行う場合にも膨大なデータを解析し直すことは難しく、透明性の担保に課題がある。

またこのアプローチの場合、評価の十分性については走行した距離や時間に対するセーフティドライバのオーバーライドの件数で確率的に説明することになるが、この確率の分母に当たる走行データに含まれる交通条件・環境条件が、実際に発生しうるシステムの安全性に影響を及ぼす要因と範囲を網羅している保証はなく、その十分性について実際に発生する交通条件・環境条件に対する決定論的な十分性の判断ができない。言い換えると、走行距離や時間を長くすることで結果として危険事象が発生する要因の項目や範囲をカバーする範囲は確率的に高まるものの、この距離や時間の中に含まれていない要因による危険事象がリリース後に発生しないことは保証されない。

1.4.2. データ蓄積・分類型シナリオベースアプローチ

このような従前の自動運転実証実験や先進運転支援システム(Advanced Driver Assistance Systems: ADAS)開発プロセスを SAE 自動化レベル3以上の安全性保証に適用する場合の課題に対応するために、蓄積した交通流観測データや事故データを『シナリオ』という形で体系的なカテゴリに分類して蓄積することでシナリオデータベースを形成するデータ分類型シナリオベースアプローチ(例: PEGASUS <https://www.pegasusprojekt.de/en/about-PEGASUS>)が提案され、各国のプロジェクトで検討が進んでいる。

個社の知財として秘匿化されている走行データとは別に、パブリックドメインで走行データを蓄積し形式知化して積み上げることで、検証基盤のエコシステムの構築を狙える点で認証機関と製造者双方にとって、合理性があるように見える。

しかし、実際にはこのアプローチは依然としてリリース前の検証範囲の十分性の課題について答えていない。得られたデータにタグ付けを行い『カテゴリ分け』を行う場合に、将来発生しうる現象に対する補償は依然として距離と時間もしくはデータ量に依存したものであるため、前章で述べたような構造上の問題を解決できていないためである。また、パブリックドメインで共有される走行データは『画像』や『走行軌跡』のデータであり、自動運転車が周辺の状況や自分の位置を誤る原因や車両安定性を損なう原因をカバーしたデータを得られないという点も、決定的な検証範囲の不足の原因になる。

1.4.3. 『Physical Principle Approach Process (物理原則に基づくシナリオベースアプローチ)』の概要

既存のアプローチの課題である評価範囲とクライテリアの課題に対して、原理原則に基づくシナリオベースアプローチによるエンジニアリングフレームワーク『Physical Principle Approach Process』を提唱する。

まず検証範囲の十分性について、自然現象や交通流の組み合わせは無限に存在し、交通環境を分類して組み合わせるだけでは現実的に検証をやりきれず、十分な検証範囲を確保できない。そこで環境を俯瞰的に見て分類するというアプローチでなく、

表 1 で示すように自動運転の動的運転タスクを実行するために必要なプロセス(認知、判断、操作)において、各々の物理原則で処理結果に影響を及ぼす要因を「認識外乱、交通外乱、車両運動外乱」とする。そして、プロセス毎シナリオ体系として構造化することで(図 5,図 6)、有限かつ安全の観点で網羅的な範囲の特定を可能にする。

表 1 運転タスクのプロセスと物理原則

プロセス	処理結果	外乱	物理原則
認知	周辺交通環境の位置情報、自己位置。 交通情報	認識外乱	センサメカニズムに応じた原理的な外乱(例)カメラ:可視光、ミリ波:電波、LiDAR:赤外光
判断	軌跡、車速目標指示	交通外乱	道路構造+交通参加者との位置関係といった幾何的観点と、交通参加者の動作
操作	軌跡、車速目標指示を達成するための各ACTへの運動指示分配	車両運動外乱	道路形状や自然現象から車体へ、路面やタイヤ状態からタイヤへ入力される力学的な外乱

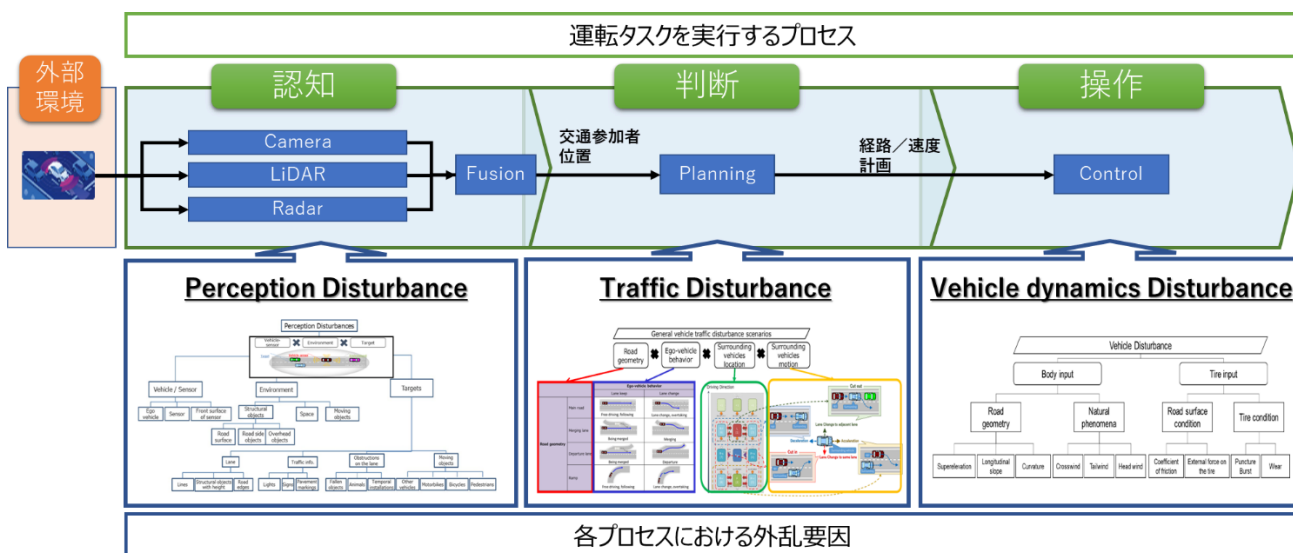


図 5.運転タスクと外乱要因

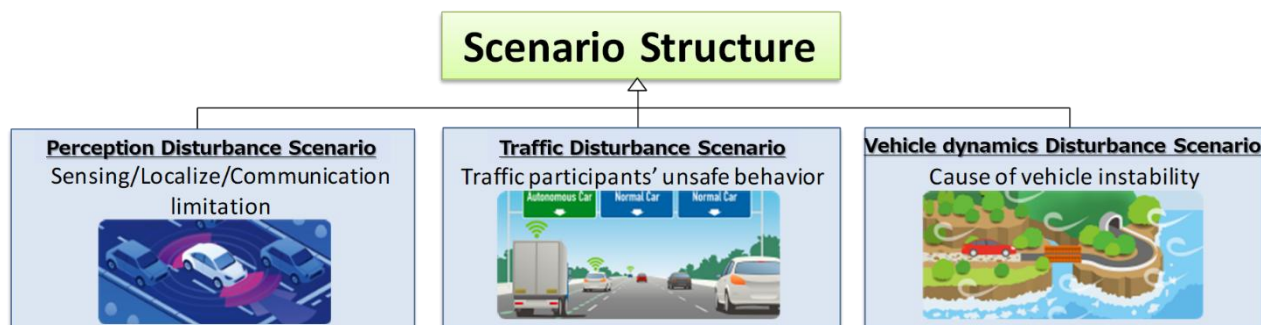


図 6. 物理原則毎の 3 つのシナリオ体系

認識外乱とは、センサシステムが、センサや車両の内因的理由または外因的理由のために、危険を正しく認識できない状態を指す。内因的理由の例には、部品の取付け(例えば、センサの取付けまたは製造上のばらつきに関連する不安定性)、または車両の状態(例えば、センサの方向を変更する不均一な荷重による車両の傾斜、または自転車ラックのような外部取付けによるセンサの遮蔽)が含まれる。外因的理由には、周囲の車両によって誘発される環境条件(例えば、センサの曇り、汚れ、光など)、または死角が含まれる。

交通外乱とは、道路の幾何学的形状(例えば、分岐路)、自車両の挙動(例えば、車線変更)、及び周辺車両の位置及び動き(例えば、自車近くでの周辺車両の車線変更:カットイン)の組合せの結果として生じる危険性がある交通状況を指す。

車両運動外乱とは、認識と判断が正常に機能するが、車両が自らのダイナミクスを制御できない可能性がある状況を指す。これは、車両内部の要因(例えば、総重量、重量バランスなど)または車両外部の要因(例えば、路面の不規則性および傾斜、風など)による可能性がある。

なお、蓄積した交通流観測データや事故データは実際に生じている状況から理論的に構築したシナリオ体系にヌケモレがないか十分性を確認することや、定性的なシナリオ体系に対して定量的な物理パラメータを付与する上で確率的な範囲として実際にどの程度生じているのか交通流の縮図を示すことに活用できる。

2. 用語と定義

2.1. ODD (Operational Design Domain: 運行設計領域)

特定の運転自動化システムまたはその機能が動作するように特別に設計された運転条件。これには、環境的、地理的、時間帯による制限、および／または特定の交通状況や道路特性の必要条件の有無などが含まれるが、これらに限定されない。

[SOURCE: ISO 34501:2022, 3.26]

2.2. OD (Operational Domain: 運行領域)

動作条件のセット。これには、環境的、地理的、時間帯による制約、および／または特定の交通状況または道路特性の存在または不在に関する要件を含むが、これらに限定されない。

注記: このセットは、特定の環境における実世界の条件、地理的条件、試験用の合成条件、およびその他の様々な目的を記述するために使用できる。

[SOURCE: ISO 34503:2023 ,3.9]

2.3. 動的運転タスク (Dynamic Driving Task: DDT)

道路交通における車両運転に必要な、すべてのリアルタイムの操作的(車両の安定的な操作に関するタスク)および戦術的(走行中の判断や操作に関するタスク)機能の総称。ただし、経路計画や目的地・経路地の選択といった戦略的機能は含まない。

[SOURCE: ISO/SAE PAS 22736: 2021, 3.10, modified- All notes have been deleted.]

2.4. OEDR (Object and Event Detection and Response)

動的運転タスク (DDT) のサブタスクであり、運転環境中の物体および事象を検出し、認識し、分類し、かつそれらに応答(対応)するために必要な一連の操作を指す。

[SOURCE: ISO/SAE PAS 22736: 2021, 3.19]

2.5. 認識外乱 (Perception disturbance)

自動運転車両のセンサシステム(カメラ、LiDAR、レーダ、GPS など)が、センサや車両の内因的理由または外因的理由のために、周囲環境を正しく検知・認識することを妨げる要因や事象。

2.6. 交通外乱 (Traffic disturbance)

道路の幾何学的形状、自車両の挙動、及び周辺車両の位置及び動きの組合せの結果として、自動運転システムの計画された走行に予期しない影響を与える事象。

2.7. 車両運動外乱 (Vehicle dynamics disturbance)

車両の安定した運動(加速・減速・旋回・直進など)に対して、外部環境や道路条件から加わる予期しない力により車両運動性能を制御できない可能性がある事象。

2.8. 妥当性確認 (Validation)

実装されたシステムが、意図した運用環境において、意図した機能に対する安全要求事項を満たしていることを客観的証拠によって確認すること。

2.9. Competent and Careful human Driver (C&C Driver)

必要な技能・知識を備え、道路交通法を遵守し、常に覚醒状態であり周辺車両等に注意し的確な能力と慎重さを持つ人間ドライバのことである。

2.10. 回避行動 (Avoidance behavior)

交通上の危険や衝突リスクを認知した際に、事故を未然に防ぐために自動運転システムが取る緊急的な操作。

2.11. クリティカルパラメータ (Critical parameter)

システムや機能の安全性・性能に直接的かつ重大な影響を与える変数や条件。これが逸脱すると、危険状態や性能低下につながる可能性があるパラメータ(例: 車速、車間距離、天候、路面摩擦係数など)。

2.12. Preventable/Unpreventable (回避可能／回避不可能)

適切な認識と判断・操作を行えば衝突を回避できる事象／どのような操作をしても衝突が避けられない事象。

2.13. Foreseeable/Unforeseeable (予見可能／予見不可能)

過去の事例や状況、エキスパートの経験知、実交通環境で通常発生し得る事象／常識的に考えて事前に発生の予見が困難な事象。

2.14. Validation environment (妥当性確認環境)

対象システムが意図した機能 (Intended Functionality) を満たし、安全に機能することを確認するために、妥当性確認 (Validation) を実施する評価環境のこと。

2.15. Critical Condition

リスクが顕在化しシステムの動的運転タスク (DDT) に直接影響を及ぼす状態であり、これは交通状況において、衝突や危険事象が差し迫っており、適切な認知・判断・操作により回避行動を即時にとらなければ事故に至る可能性が高い状況のこと。

2.16. Pre-critical condition

要因が存在するが直ちにハザードに至らない潜在的なリスク状態であり、これは交通環境において、まだ衝突は差し迫っていないが、適切な認知・判断・操作を怠れば Critical Condition に移行し得る危険予兆状況のこと。

2.17. Validation for system safety

実装されたシステムが、意図された運用環境に統合されたとき、機能不十分性や合理的に予見可能な状況を考慮した上で、受け入れ可能な安全レベルを達成していることを、検証と客観的証拠により確認すること。

2.18. Physical Principle Approach Process (物理原則に基づくシナリオベースアプローチ)

システムが依拠している物理的な原理や現象を起点に、その機能の限界や安全性リスクを体系的に洗い出し、評価・妥当性確認に結びつけるプロセス。

2.19. シナリオデータベース

自動運転システム(や運転支援システム)の検証・妥当性確認に用いる交通シナリオを、体系的に収集・整理・管理したデータベース。

2.20. データ駆動型アプローチ

実世界から収集されたデータ(走行データ、事故データ、センサデータなど)を出発点にして、シナリオ抽出・モデル構築・安全評価を行う手法。

2.21. 不検知 (False Negative)

実際には対象(障害物・歩行者・信号など)が存在しているのに、システムがそれを検知できなかった誤りのこと。

2.22. 誤検知(False Positive)

実際には対象(障害物・歩行者・信号など)が存在しないのに、システムが存在すると誤って検出してしまうこと。

2.23. 附着利用率

タイヤと路面の摩擦力(附着力)をどの程度利用しているかを表す指標。

2.24. On driving path

自車の進路経路(Driving path)上に対象物が存在する状態。

2.25. Into driving path

自車の進路経路外に、対象物が存在し、その後に側方や交差方向から進入してくる状態。

2.26. 死角(Obstructed view)シナリオ

自車の周辺車両、構造物、道路形状によって視界が物理的に遮られる状態のシナリオ。

注: 一般的にドライバの直接視認できない(例えばミラーやピラーなどにより)領域を死角(ブラインドスポット)と指すが、ここでは日本語表記は“死角”、英語表記を“Obstructed view”と記載する。

3. 自動運転システム安全論証構造 (Safety argumentation structure)

本章は、SAE 自動化レベル3以上の自動運転車両の動的運転タスクについての自動運転システムの安全論証構造について述べる。

3.1. シナリオベースの安全保証プロセス

高度運転支援システム(ADAS)や自動運転システム(ADS)における安全性保証は、従来の機能安全規格 ISO 26262 に加え、意図した機能の安全性(Safety Of The Intended Functionality: SOTIF)を対象とする ISO 21448 の適用が不可欠である。ISO 26262 は、電気/電子(E/E)システムの機能不全を起因とする不合理なリスクを排除することを目的とし、ハザード分析及びリスクアセスメント(Hazard Analysis and Risk Assessment: HARA)を通じて安全目標を定義する。一方で、ISO 21448 は、E/E システムが故障していなくとも、他の交通参加者の振る舞いやセンサ認識やアルゴリズムの不十分性により発生し得る潜在的に危険な挙動を対象とし、その不合理なリスクの排除を目指す。

両者は対象とするリスクの起源が異なるが、いずれも「不合理なリスクを除去する」という共通の目的を有しており、相補的な関係にある。特に ADS では、外部環境や内部状態のセンシングに依存する機能が増大するため、機能不全のみならず意図した機能の不十分性によるリスクを網羅的に考慮する必要がある。そのため、シナリオベースの安全性評価が重要であり、多様な走行環境、交通参加者、道路条件、天候などを考慮したシナリオを設定し、潜在的リスクの同定と緩和策の策定を行うことが求められる。

図 7 は、ISO 21448 に準拠し、意図した機能に影響を与えるリスク要因および関連するクリティカルシナリオを特定するシナリオベースの安全性評価プロセスを含むことで、その内容に具体性を付与している。

また、これらのプロセスを適用し、ADS に不合理なリスクが存在しないかを評価する一連の流れを示した安全性評価プロセスの概要図である。

さらに、安全検証を開発後半に限定せず、開発前半の企画フェーズから ODD(運行設計領域)に即したセンサセットアップの検討や、ソフトウェアのアジャイル検証プロセスに組み込むことで、開発効率の向上にも寄与可能である。

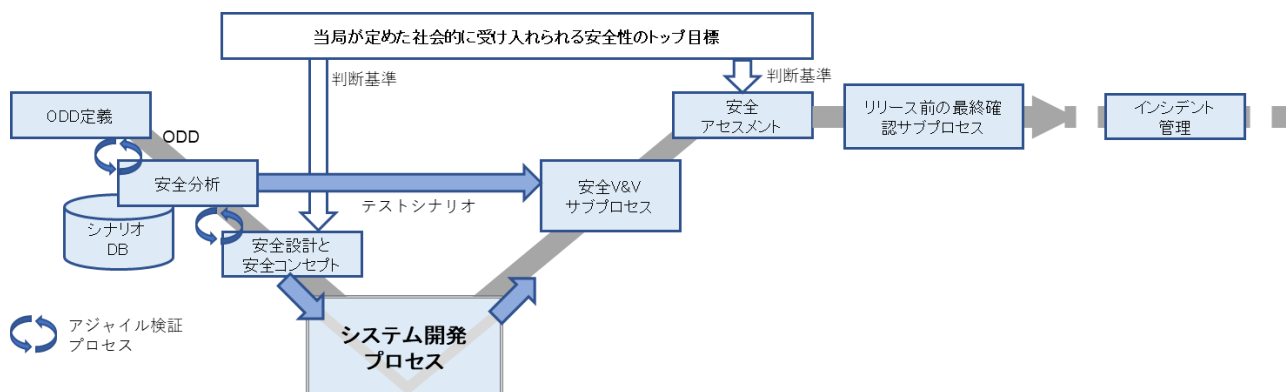


図 7. シナリオベースの安全保証プロセスの全体スキーム

3.1.1. 安全保証プロセスのスキーム

3.1.1.1. ODD 定義

運用設計領域(ODD: Operational Design Domain)定義は、シナリオベースの安全性保証プロセスにおける最初の重要なステップであり、対象となるシステムや機能の範囲・内容・ODD を明確に定義する。ODD は、「どこまで何を動かすものなのか」「どんな環境や条件で動かすのか」を技術的・機能的・運用的に整理する作業であり、内容には、少なくとも道路の種類、道路内の位置、車速範囲、および環境条件などの情報が含まれなければならない。また、ODD 境界の外側へ遷移するためのフォールバック戦略も設計される必要があり、ADS は、定義された ODD 内で動作しているかどうかを検出する必要がある。ODD の定義は、オーナーズマニュアルや HMI などによりユーザに通知され、ADS を理解し信頼し、操作できるように構成されなければならない。

(出典: Khastgir, Birrell, Dhadyalla, & Jennings , “Calibrating trust through knowledge: Introducing the concept of informed safety for automation in vehicles”, 2018)

3.1.1.2. 安全分析とシナリオデータベース

可能な限り多くの予見可能なシナリオを決定し、ODD と車両とその周辺に関する詳細なシナリオ関連情報を体系化するために、系統的組合せアプローチを適用した ODD の全体的な定義に加えて、システムの物理学に基づく ODD の技術的に包括的な定義が重要である。例えば、「降雨」という用語は、降雨条件が ODD に含まれている場合に人と意思疎通するのには十分であるが、ADS に対しては、同様に概念を解釈することができない。このシナリオは、代わりに、雨滴がセンサ性能に及ぼす影響の可能性、または降雨が車両運動に及ぼす影響(タイヤと濡れた路面との間の摩擦係数の低下)など、システムの物理学の観点から雨の影響を考慮することができる。ODD を技術的およびシステム指向の方法で記述するために、システムの物理学に関連する 3 つのカテゴリで分類する(図 6)。これらのカテゴリは、ADS の安全分析内で起こり得る認識系、交通流、および車両運動自体に関連した正常な運転を妨げる要因が存在する状況をそれぞれの外乱シナリオ(認識外乱、交通流外乱、車両運動外乱)として体系化する。

図 8 に示すように ODD 体系とシステム(3カテゴリシナリオ体系)をマッピングしておくことで、ODD 範囲に即して評価シナリオを選択することができ検証すべきテストシナリオを導出しデータベースに保管することで開発工程の後半や新たな開発において再利用が可能となる。

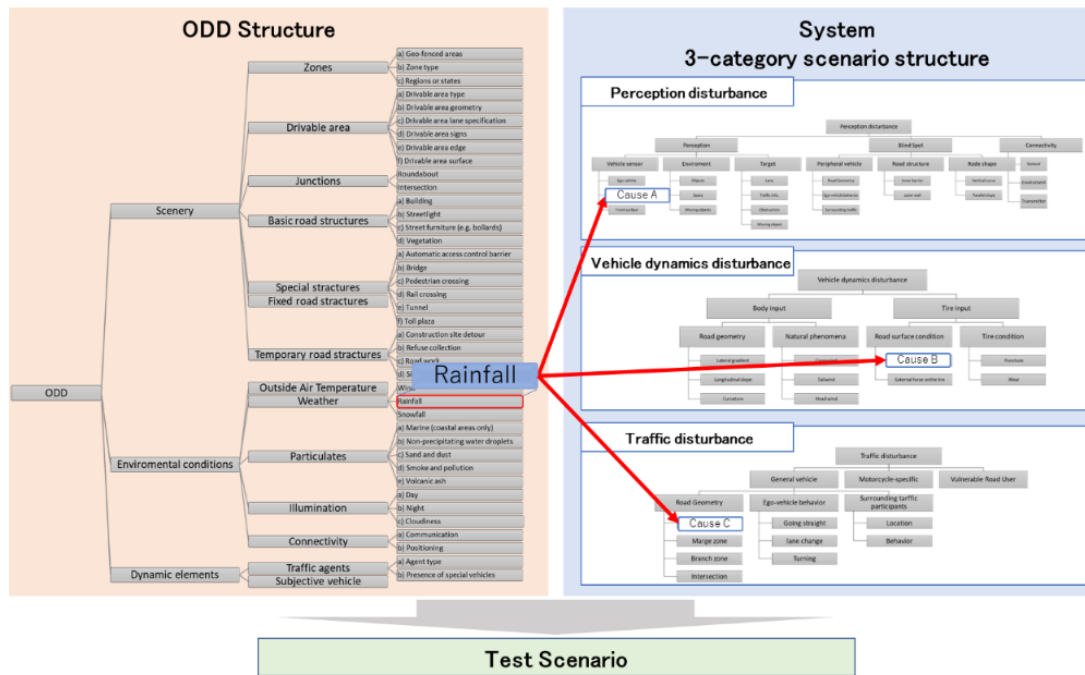


図 8. ODD 体系とシステム(3 カテゴリーシナリオ体系)の関係図

ここで、図 9 にシナリオデータベースの概要を示す。最上位の定性的なシナリオ構造を定義する Functional Scenario、運転行動の3要素である「認知」「判断」「操作」に基づき、「認識外乱」「交通外乱」「車両運動外乱」の3つのカテゴリーで体系的に構造化することで、包括的なシナリオ評価が可能になる。

次に Logical Scenario は、構造化された Functional Scenario に対して、定量的なパラメータ範囲を付与したもので、例えば交通外乱においては実交通流データから車両の軌跡を抽出し相対速度やカットイン速度などのパラメータを統計分布から定義するデータ駆動型アプローチ(Data Driven Approach)によって定義できる。なお、実交通流データは、交通監視(観測)及び運転データ、事故データベース、保険データ、地図及び道路データ等を指す。

そして Concrete Scenario は、具体的に評価を行う一つ一つの評価条件であり、安全状態と不安全状態を区別できる安全性判定の境界等から抽出することが考えられる。

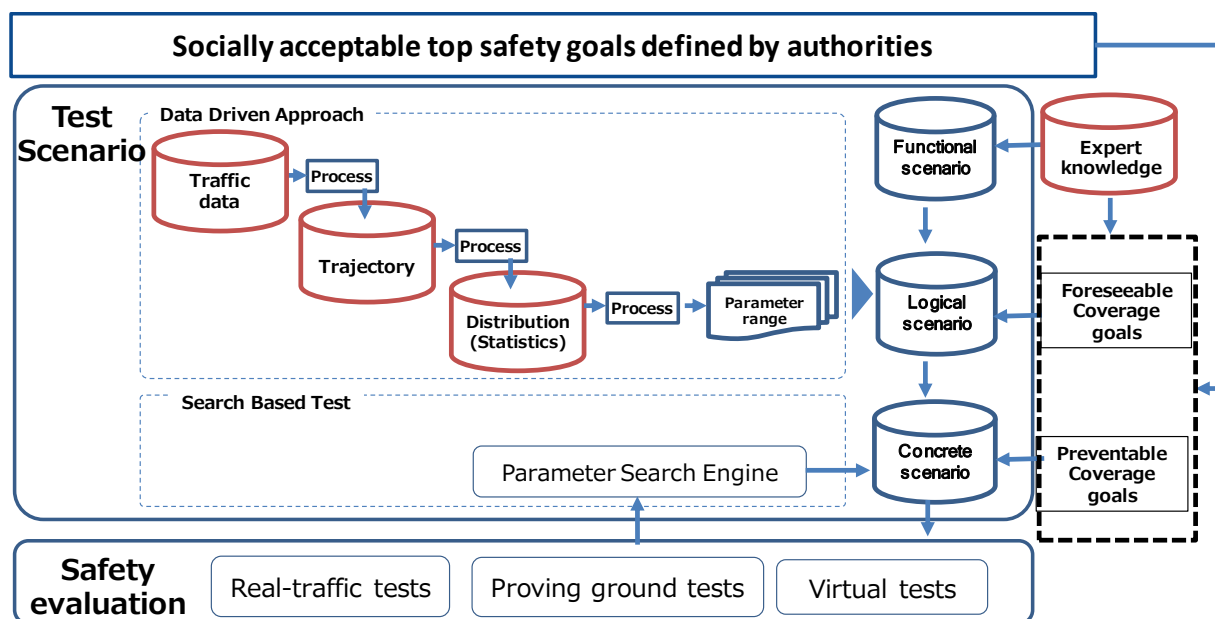


図 9 シナリオデータベースの概要

3.1.1.3. 安全設計と安全コンセプト

システムの安全要件は、安全解析ステップに基づいて作成すべきである。この工程で、当局によって定義された安全目標（以降、「判断基準」※）も、開発サイクルに組み込まれ、システム設計において検討される。複雑さの異なる層が安全設計に加えられるので、安全分析サイクルは、それらのアウトプットが安全分析ステップに従う限り、この工程と先行工程との間で必要に応じて統合され得る。システム開発プロセスにおける不必要な仕様変更を回避するために、ODD とシステム要件との間の適合性の確保が重要である。これは、安全分析ステップの役割と重要性を示す。

※「判断基準」とは、例えば国連欧州経済委員会自動車基準調和世界フォーラム（WP29）において定められた、「自動運行装置が引き起こす人身事故であって合理的に予見される防止可能な事故が生じないこと」を定量化した基準（*UN R-157 Annex3* 及び 6 章を参照）。

3.1.1.4. システム開発プロセス

システム開発プロセスは、安全設計で導出されたシステム要件を具体的なハードウェアおよびソフトウェアの構成要素へと反映し、実際の自動運転システムを構築するプロセスである。

3.1.1.5. システムと車両の検証と妥当性確認（安全 V&V サブプロセス）

この時点で、ドライバとの相互作用なしに、システムと車両の安全性を検証および妥当性確認する戦略を定義する。これらの検証と妥当性確認は、仮想評価と実交通環境やテストコースによる物理テストを組み合わせることになる。

検証のサブプロセスでは、システム、開発機能及び適用された安全対策の数学的および物理的な正確さをチェックする。また、安全分析（センサ、アルゴリズム、アクチュエータ関連対策の充足度）で策定された安全仕様と要求事項が全て満たされていることを確認する。

妥当性確認のサブプロセスは、適用された安全対策を含むシステムが、交通参加者に不合理なリスクをも

たらないことを確認する。また、定義した妥当性確認の目標が達成されたことを確認することによって、ADS の安全性を実証する。

3.1.1.6. 安全アセスメント

安全アセスメントは、最終製品の安全性を定量的かつ体系的に評価し、国際的に定められた判断基準に基づき合否を判定する重要なプロセスである。本工程では、関連する審査、文書化チェックおよび認証に加え、評価結果説明のエビデンスのためにシナリオベースで策定されたテストケースとのトレーサビリティを確保し、評価の網羅性と妥当性を保証する。

3.1.1.7. リリース前の最終確認サブプロセス

リリース前の最終確認サブプロセスは、ADS の安全性と信頼性を総合的に検証し、リリース可否を判断するための最終段階である。本工程では、残存リスクが許容範囲内にあることを確認するだけでなく、ODD に基づく多様かつ代表的なシナリオ、ならびに極端条件下でのシナリオについて十分な検証が行われていることを確認する。

評価にあたっては、行動安全アセスメント(BSA)などの技術を用い、事前定義された行動基準や安全目標に対する適合性を確認する。また、フォールバック戦略やフェイルセーフ動作についても、システムの限界条件下で安全を確保できるかを最終的に確認する。

さらに、利用者がシステムの機能や制約を正しく理解し、適切に使用できるよう、HMI(Human-Machine Interface)の設計や説明責任の確保も確認項目に含める。

最後に、上市後のインシデント管理・フィールドデータ収集に円滑に移行できるよう、事後監視と改善プロセスへの接続性を確認する。これにより、リリース後も継続的に安全性を強化し、長期的な信頼性を確保することが可能となる。

3.1.1.8. インシデント管理

自動運転システムの安全性を長期的に保証するためには、設計・開発段階での検証に加え、運用中に発生するインシデントを継続的に収集・解析し、改善に反映するプロセスが不可欠である。

インシデント発生時には、ユーザからの迅速な報告体制を整備し、必要に応じて規制当局や認証機関への通知を行う。収集したインシデントは、根本原因分析(Root Cause Analysis : RCA)を通じて体系的に解析され、再発防止策や改善策としてシステム設計・ソフトウェアアップデート・運用マニュアルに反映される。

このようなフィードバックループを安全保証プロセスに体系的に組み込むことで、時間の経過とともに「予測不可能な」状況を減少させる。この結果図 10 に示すように、より多くのシナリオを予測可能かつ防止可能な領域へと拡張することが可能となる。最終的に、これは ADS の進化とともに長期的な安全性向上に寄与する。

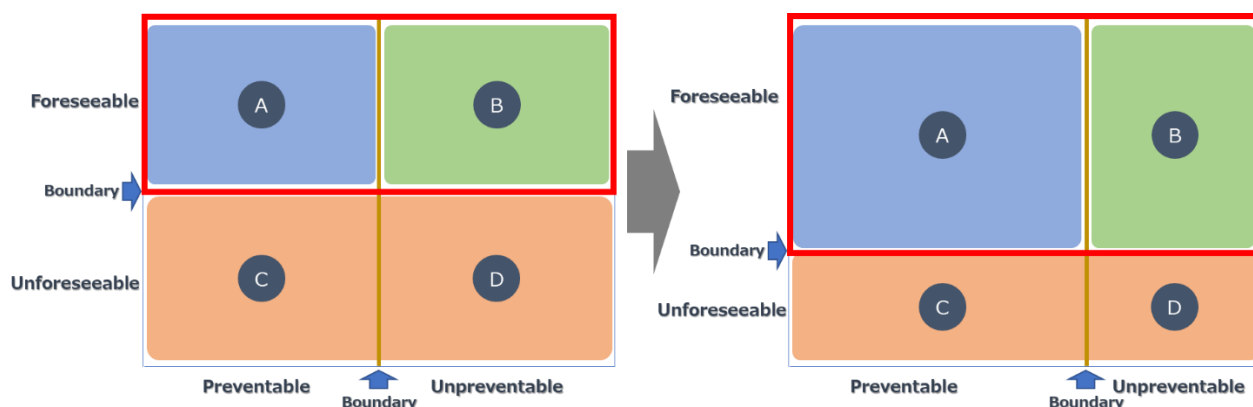


図 10. ADS の進化による予見可能性と防止可能性領域の広がり

3.2. シナリオ体系の概要

自動運転システムの安全性を評価するためのシナリオ体系は、動的運転タスクを「認知」「判断」「操作」の三つのプロセスに対応させて構築される(図 11)。各プロセスにおいて物理原則に基づいて発生し得るリスク要因を、認識外乱・交通外乱・車両運動外乱 の三分類に整理することで網羅性を確保している(図 12)。

- ・ 認識外乱: センサや環境条件に起因する知覚の不確実性
- ・ 交通外乱: 道路構造や周辺車両の挙動に起因するリスク
- ・ 車両運動外乱: 路面条件や外力による車両ダイナミクスの不安定化

これら三つの外乱カテゴリは、抽象的なシナリオ (Functional Scenario) から定量的パラメータを付与したシナリオ (Logical Scenario)、さらに具体的な評価条件 (Concrete Scenario) へと段階的に展開される。そして、体系的にシナリオデータベースとして管理されることで、予見可能かつ防止可能な状況を包括的にカバーし、自動運転システムの安全性評価に資する枠組みを形成する。

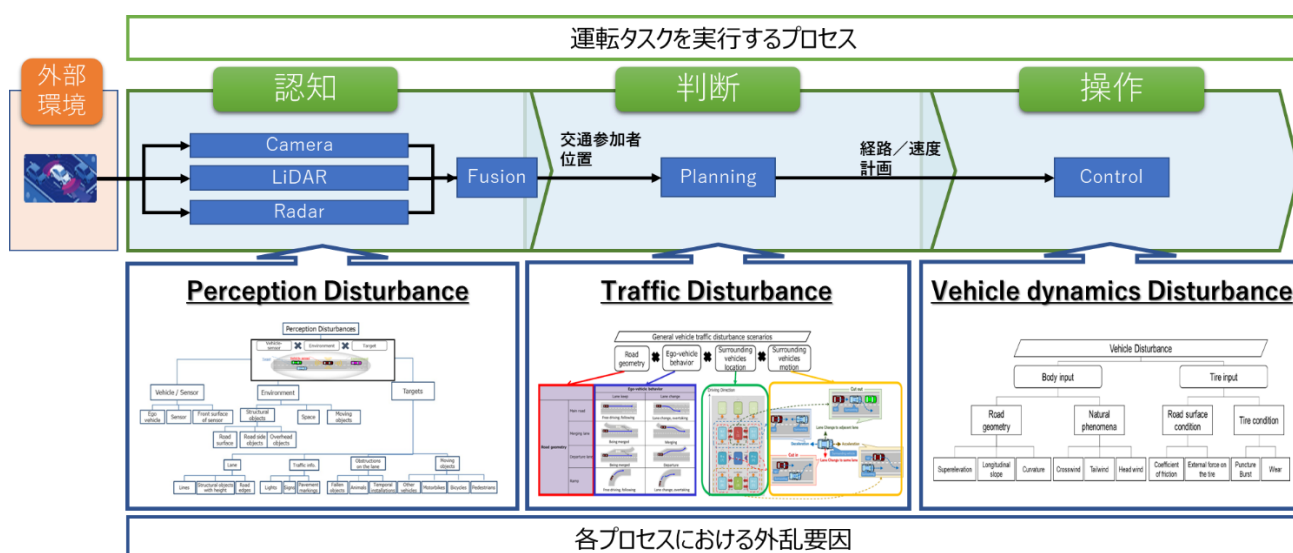


図 11 シナリオ構造

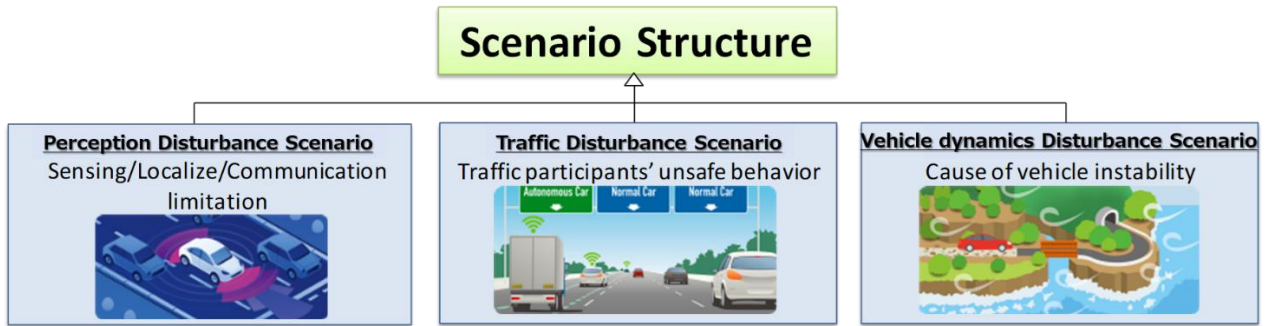


図 12 物理原則毎の 3 つのシナリオ体系

3.3. 安全性の判定方法の考え方

安全原則を具体的な評価手法に適用するフレームワークとして、まず自動運転の動的運転タスクの安全リスク(safety risk)は周辺の交通参加者もしくは障害物と衝突することであることから、これをまず交通外乱シナリオとして体系化し、この交通外乱シナリオ体系に対して、Reasonably Foreseeable の範囲と Preventable な範囲を定義することで、エンジニアリングに測定可能な形に落とし込む。この交通外乱シナリオをベースとして認識外乱、車両運動外乱が加わっても衝突が起きないことを検証することで全体の検証が可能になる。(図 13)

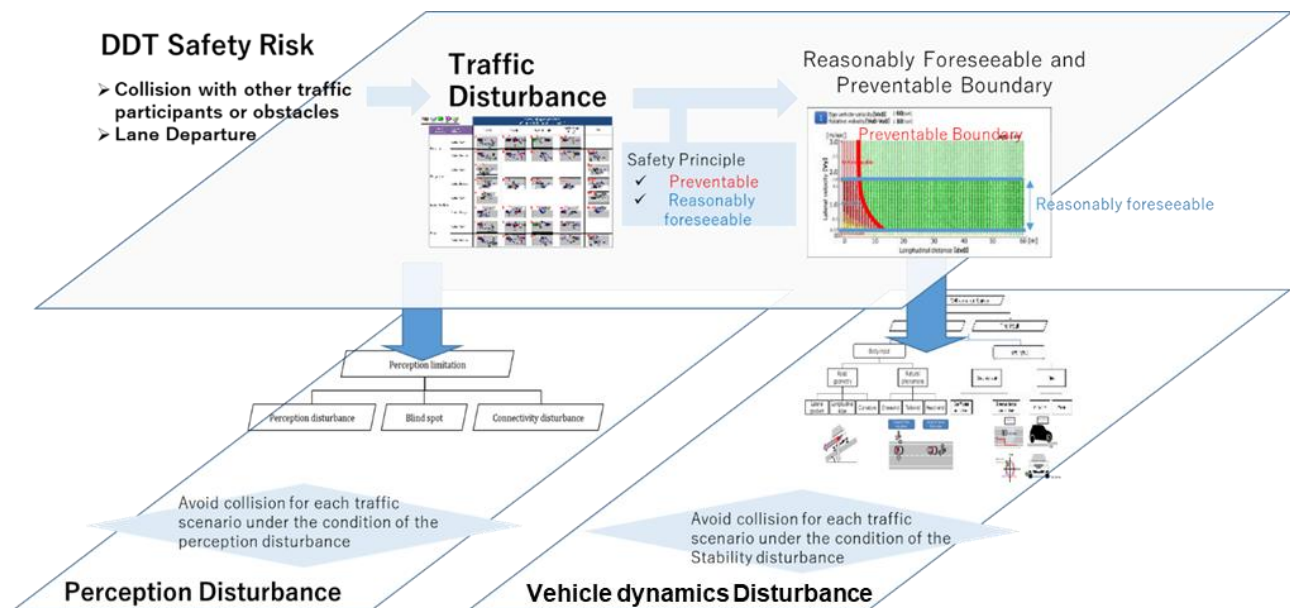


図 13. 安全性の判定手法の概要

3.3.1. 交通外乱の安全性判定手法

前述の通り、安全基準の基本的な考え方は、『予見可能性の範囲において、Competent and careful human driver(C&C Driver) が回避可能なレベルよりも自動運転システムが高いレベルの回避性能を具備していること』である。この考え方を交通外乱に適用するには、C&C Driver のパフォーマンスを定義し、モデル化することが必要となる。この定義したモデルをシミュレーションプログラムに実装し、C&C Driver が回避可能な範囲を具体的に導出することで、交通外乱に対する安全基準を定義する事が可能である。

ここで、C&C Driver モデルを定義する上で、以下の社会受容性の観点を考慮した。

- ・ 刑事上の過失責任の有無については「一般ドライバの運転能力」が判定基準になる
- ・ 実際の交通環境では注意レベル、怯みなどから構えて運転を行う実験結果よりもドライバの対応レベルは低いことから、実験データに基づいて定めたリファレンスドライバを目標値に置くことで余所見、怯みのない自動運転システムは事故軽減効果が望めると考えられる

このことからターゲットとする C&C Driver は、常に覚醒状態であり周辺車両等に注意し的確な能力と慎重さを持つドライバである。また C&C Driver モデルの定義は、運転行動要素の「認知」「判断」「操作」の三要素で定義可能である(図 14)。それぞれの段階で示すパフォーマンスに関するパラメータ係数を客観的な根拠を持って定義することが重要である。

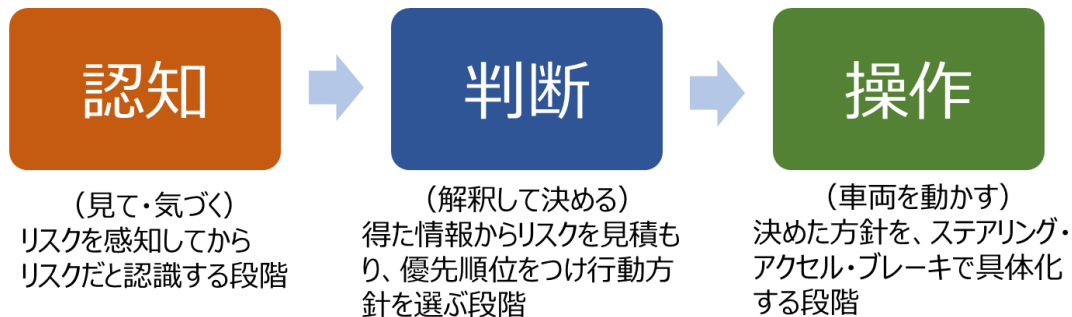


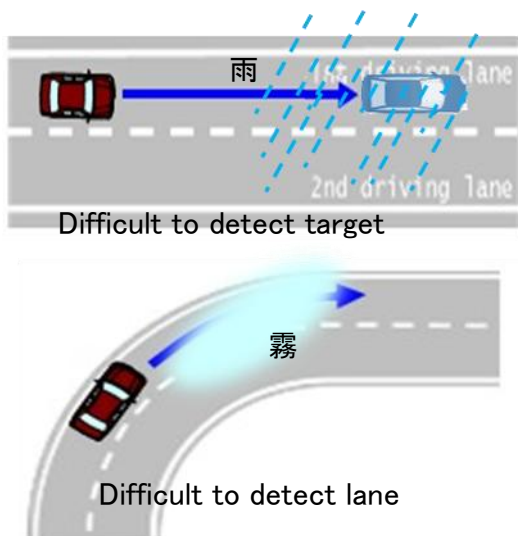
図 14. 運転行動要素の三要素

判定手法

- ・ Foreseeable 領域(予見可能性の範囲)を決定する:物理原則に基づき予測可能であり、通常発生する交通流(他運転者の一定の違反や実勢速度なども考慮する)
- ・ Preventable 領域(回避可能範囲)を決定する:ADS の衝突回避能力は C&C Driver が達成できる性能と同等かそれ以上とする
- ・ 決定した Foreseeable 領域および Preventable 領域において、Physical Principle Approach Process によって導出された交通外乱シナリオによって対象 ADS を評価する

3.3.2. 認識外乱の安全性判定手法

認識外乱とは、自動運転システムのセンサが対象物や環境を正しく認識できない(図 15-A)、あるいは誤って検知してしまう状況(図 15-B)を指す。これは、センサ原理(カメラ、LiDAR、ミリ波レーダ等)の限界や、気象条件、周辺構造物など外部要因に起因する。



(A) 環境による外乱例

		Real World	
		Positive = 存在する	Negative = 存在しない
Sensing	Positive = いると判断する	True Positive = 検知成功 😊	False Positive = ゴースト (いないものをいると判断してしまう) → 誤検知 😞
	Negative = いないと判断する	False Negative = 検知失敗 → 見逃し、不検知 😞	True Negative = 何もいないことを正確に検知 😊

(B) 外乱により生じる認識結果

図 15 認識外乱要素

安全性判定は以下の流れで行う:

1. 外乱条件の定義

- 外乱は「不検知 (False Negative)」と「誤検知 (False Positive)」に分類される (図 16)
- ODD 内で生じ得る環境条件 (視程、明度、雨量、路面反射、逆光など) に基づき、それぞれの外乱範囲を設定する
 - 道路構造、道路交通法、その他の法律・規制などで定義される範囲
(例: 視程 50m 以下では通行止め、段差 15cm 以上は路面補修対象、など)
 - 統計データから、ある一定の確率であり得ると判断される範囲
(例: 雨量、明るさ、太陽高度、など)

2. 判定手法

- 安全原則は「交通外乱シナリオ下で、認識外乱が生じても衝突を回避できること」である
- 判定は個別のセンサ単位ではなく、センサフュージョンを含むシステム全体で実施する
- 認識性能が部分的に低下しても、システム全体で C&C Driver と同等以上の回避性能を維持できることを確認する

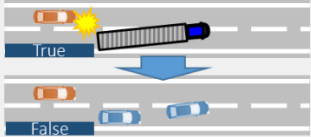
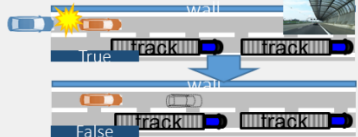

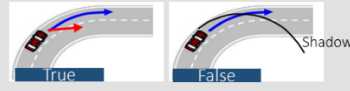
2 kinds of perception target	2 types of perception result with disturbance	
	false negative (不検知)	false positive (誤検知)
Road object	No collision on traffic disturbance because of false negative 	No collision on traffic disturbance because of false positive 
Lane	No lane departure because of false negative 	No lane departure because of false positive 

図 16. 認識外乱状況の四分類

3.3.3. 車両運動外乱の安全性判定手法

車両外乱では人のドライバであっても完全には予測困難な場合が多いため、判定手法は「回避可能条件下での安定走行」と「回避不可能条件下での被害緩和」という二層構造で整理される。

安全性判定は以下の流れで行う：

1. 前提条件

- ・ 道路は構造令や維持修繕基準を満たす設計・管理状態にあること
- ・ 運転者が整備不良（極端な摩耗や空気圧不足など）を認識した状態で運行しないこと
- ・ 想定外の極端な環境（冠水、災害級の暴風雨など）は除外する

2. 評価手順

- ・ 外乱要因（路面摩擦係数、道路曲率、横風、タイヤ外力など）を作用力として定量化する
- ・ 車両の制御限界を「附着利用率 ε 」で表し、 $\varepsilon \leq 75\%$ であれば回避可能（Preventable）、超える場合は回避困難（Unpreventable）と判定する
- ・ 回避可能条件下では、車線逸脱なく走行を継続できることを確認する
- ・ 回避不能条件下では、衝突緩和のための減速やフェイルセーフ戦略の適用を求める

3. 判定手法

- ・ 自動車専用道路における設計速度（日本は 100km/h）で走行を継続できることを要件とした場合：
 - 路面状態：摩擦係数が 0.3（ロック μ ）以上、タイヤへの外力は道路維持修繕の目標値以下（例：轍：25mm、段差：30mm、ポットホール：20cm）
 - 道路形状：道路構造令の規定内のカーブ（ $R=460m$ ）
 - 自然現象：横風が速度規制無しの風速（10m/s 未満）
 上記 3 要因に関しては全て加算した条件で走行を継続できること。この条件で走行出来ない場合（例えば、横風 5m/s 以上は不可）は、製造者は予め ODD として定義する必要がある。

また、タイヤ状態としては走行中に起こるスローパンクチャーにおいて、リムが路面接地する前に検知すること。

- ・ 一般道では、自動車専用道路と異なり交通規制を厳密にコントロールすることが出来ない(低中速域のため必要性が低い)ため、以下の要件となる：
 - 路面状態：摩擦係数が 0.3(ロック μ) 以上、タイヤへの外力は道路維持修繕の目標値以下(例：轍:30～40mm,段差:40mm,ポットホール:20cm)
 - 道路形状：道路構造令の規定内のカーブ(例：設計速度 60km/h の場合 $R=120m$)
 - 自然現象：横風によって車両をコントロールできる上限風速(20m/s 未満)
- ・ 車両運動外乱が発生しても、システム全体で C&C Driver と同等以上の回避性能を維持できることを確認する。また回避不可能条件下では被害緩和に務めること。

3.4. 各外乱シナリオの分類と要因

ここでは各外乱(認識外乱・交通外乱・車両運動外乱)における分類と外乱要因について説明する。

3.4.1. 交通外乱シナリオ

交通外乱シナリオは、一般的な車両シナリオ(四輪車と二輪車を含む)と二輪車固有シナリオ、交通弱者シナリオに分類される(図 17)。これら3つのシナリオ分類は、更に道路の幾何学的形状、自車両の動作ならびに周囲の交通参加者の位置および動作や要素の異なる組合せを体系的に分析および分類することによって生成される(図 18)。

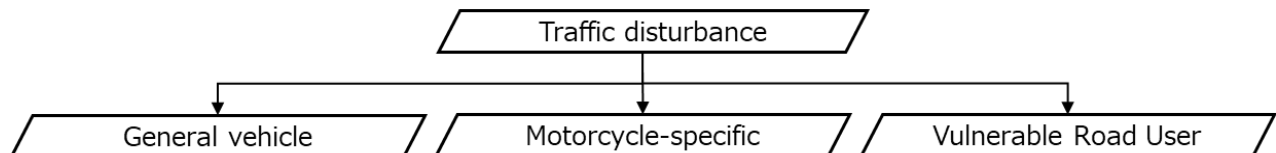


図 17. 交通外乱シナリオ分類

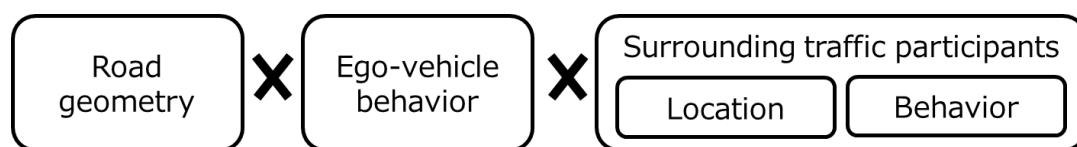


図 18. 交通外乱シナリオ構造図

3.4.1.1. 一般車両シナリオ

一般車両の交通外乱シナリオについて、具体的に道路形状、自車両の動作ならびに周囲車両の位置および動作や組合せについて説明する。

3.4.1.2. 道路形状分類

道路は、(a)単路が基本であり、別の単路が合わさることで(b)合流路が形成され、単路が分かれることで(c)分岐路が形成される。また、単路と単路が交わることで(d)交差路が形成される(図 19)。これらの複合によって様々な道路が造られる。ここで、自動車専用道では、基本的に存在しない交差路を除く本線(単路)、

合流路、分岐路の3つのカテゴリに分類した。またシナリオ作成のための道路シナリオ分類は、国際的に自動車専用道路(Association, 2004) (Transportation, 2008; UK, 2006)に適用できるように議論が必要である。

NOTE: 道路構造のパラメータについての詳細は Annex A 道路形状 を参照のこと。また道路構造によっては交通外乱だけではなく認識外乱、車両運動外乱のシナリオに影響する。

NOTE: 道路形状として他にランナバウトがある。これは、合流と分岐の組合せで表現出来る。また他に、駐車場、路面電車などが考えられるため今後新たな Annex を追加する予定である。

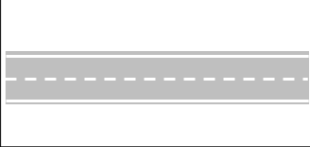
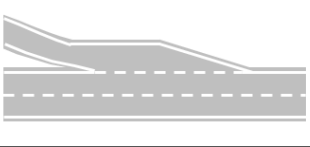
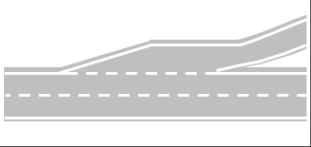
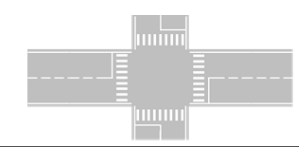
			
(a)単路 (カーブ含)	(b)合流路	(c)分岐路	(d)交差路

図 19. 道路形状分類

3.4.1.3. 自車動作分類

車両は道路形状の車線内に沿って(a)直進(レーンキープとも言う)、さらに隣接レーンや合流レーンからは(b)レーン間を移動する(レーンチェンジ)。ここで、隣接レーンまたは合流レーンからのレーンチェンジは、道路形状カテゴリは異なるものの、自車の挙動としては同じレーンチェンジである。また、交差路では、レーンチェンジは行わず旋回(右左折)の動作を行う。したがって、発生する可能性のある自車動作は、直進、レーンチェンジ、旋回の3つのカテゴリに分類される。この車両動作の分類は、前述の道路形状の情報の組み合わせで表現される。(図 20)。

NOTE: 旋回動作としては、右左折の他に U ターンもあるが、ADS は一般的な U ターンを行わないとする。但し専用の U ターン路がある場合は合流路として扱う。



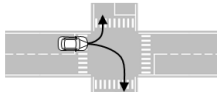
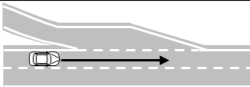
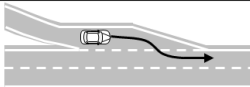
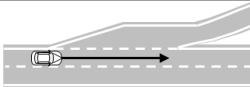
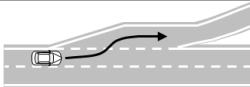
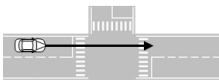
		Ego-vehicle behavior		
		Going straight	Lane change	Turning
Road geometry	non-intersection			
	Merge zone			
	Branch zone			
	Intersection			

図 20. 自車動作分類

3.4.1.4. 周辺車両の位置及び動作の分類

シナリオ構造において考慮されるべき自車周囲の車両位置は、自車の走行軌跡に侵入する可能性がある自車周囲の 5 方向の隣接位置と、交差路から侵入する左右 2 方向、さらに対向車としてどちらか 1 方向(日本国内の場合は(9)のみ対象)の合計 9 方向で定義する。また、先行車と先々行車の速度差が大きい場合

には、衝突を避けるために先行車(1)がレーンチェンジ(Cut-out)をする場合がある。レーンチェンジが突然発生した場合、自車は衝突回避のための行動をとる必要があるかもしれない。このシナリオを考慮するために、先行車両の前方の車両の位置を考慮し、「+1」として示す(図 21)。また、対向車両(9),(10)がスワーピングすることにより自車の走行に侵入する可能性があることを想定している。

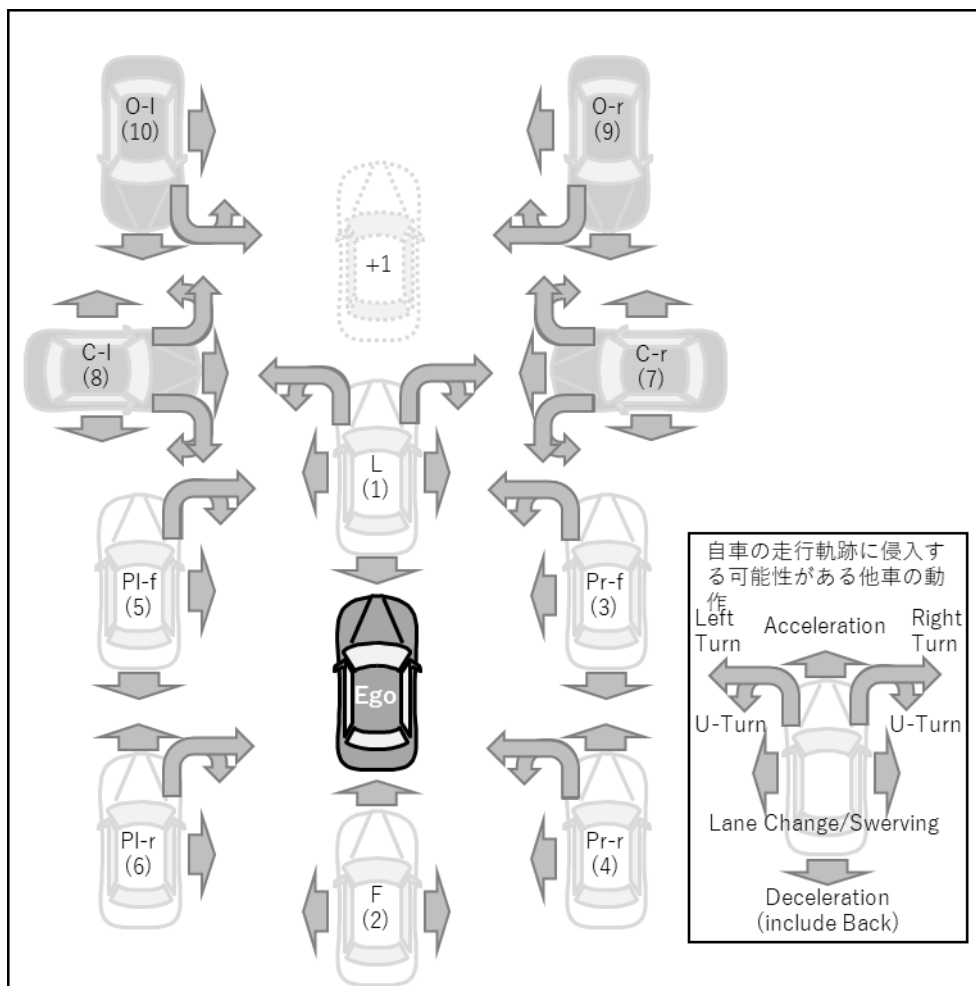


図 21. 周囲の車両位置

		Surrounding traffic participants behavior							
Surrounding traffic participants location	Vehicle location	Going straight		Lane change/ swerving			Turning		
		Acceleration	Deceleration	Cut-in	Cut-out	swerving	Right turn	Left turn	U-turn
	1. Lead(L)		✓		✓	✓	✓	✓	✓
	2. Following(F)	✓			✓				
	3. Parallel(Pr-f)		✓	✓		✓		✓	✓
	4. Parallel(Pr-r)	✓		✓		✓		✓	✓
	5. Parallel(Pl-f)		✓	✓		✓	✓		✓
	6. Parallel(Pl-r)	✓		✓		✓	✓		✓
	7. Cross(C-r)	✓				✓	✓	✓	✓
	8. Cross(C-l)	✓				✓	✓	✓	✓
	9. Opposite(O-r)	✓				✓	✓		✓
	10. Opposite(O-l)	✓				✓		✓	✓

図 22. 周囲の車両位置と自車の障害となる可能性のある運動の組み合わせ

周囲車両の動作を、直進（加速、減速）、レーンチェンジ（cut-in, Cut-out）及び Swerving（例えば停止車両などを避ける動作）、さらに旋回（右左折、U ターン）の3つのグループに分類する。安全性評価の観点からは、自車の動きを妨げる可能性のある交通参加者の動きに焦点を当てることにより、評価の回数を最小限に抑えることが可能である（図 22）。例えば、位置 2 の車両の旋回は、自車を妨害することではなく、安全分析の対象から除外することができる。図中のチェックマークは、対応する周囲車両の位置と動作の組み合わせが自車の走行に影響を及ぼす可能性があるケースを示しており、安全分析で考慮する必要がある。

3.4.1.5. 結果として生じる交通外乱シナリオ

これまでに述べた結果により、道路形状、自車動作、周囲の車両位置と動作の組合せとしてシナリオを構造化する方法論を提案した。この構造化は、合計 58 の可能な組み合わせのマトリックスで構成される（図 23）。具体的には、道路形状は「直線路」「合流路」「分岐路」「交差点」の 4 カテゴリ、自車動作としては「直進（レーンキープ）」「レーンチェンジ」「旋回（右左折）」の 3 カテゴリ、周辺車両の位置及び動作は「直進（同方向の加減速、交差、対向）」「レーンチェンジ（Cut-in, Cut-out）／スワービング」「旋回（同方向／対向の U ターン、右左折、）」の 3 カテゴリとなりシナリオは合計 58 の可能な組み合わせのマトリックスで構成されており、実際の交通流で実現可能なテストシナリオに対応している。事故につながる可能性のあるすべての危険な事例をカバーするこれら 58 シナリオの充分性は、比較事故分類（Annex D 事故データに基づく交通流外乱シナリオ体系の網羅性検証）に基づいて評価することができる。このマトリックスは、2 つの車両間の相互作用のための交通外乱の包括的なカバー範囲を扱う。

ここで示した交通外乱シナリオ（図 23）に記載しているシナリオは代表であり、周囲の車両位置と自車の障害となる可能性のある運動の組み合わせ（図 22）を考慮することが必要である。ここで、この段階では左右いずれからの侵入（レーンチェンジ等）も同じ振る舞いとして扱われる。例として、道路形状：単路、自車動作：レーンチェンジ、周辺車両の動作：直進・レーンチェンジとした図 23（No.9,10,12,13）について展開したシナリオ結果を図 24 に示す。更に No12 について説明すると、自車がレーンチェンジする際に周辺車両は自車の前方向にいる場合、後方向にいる場合、横方向（前もしくは後ろの周辺車両が自車横にいた場合）を考慮する必要がある。また車線数が異なると同じ周辺車両の位置でも障害となる可能性の経路が異なることも注意が必要である。このように周辺車両位置や車線数を考慮し、自車の障害となる可能性のある運動の組み合わせを抽出することが重要である。

Road sector and subject-vehicle behaviour		Surrounding traffic participants location and behaviour																		
		Subject-vehicle behavior	Going straight						Lane change / Swerving				Turning							
			Same / Crossed(from R/L) direction			On coming			Same / Crossed(from R/L) direction		On coming		Same / Crossed(from R/L) direction		On coming					
Road sector																				
non-intersection	Going straight (Lane keep)	No1		No2		No3		No4		No5		No6		No7			No8			
		Lane change	No9		No10		No11		No12		No13		No14		No15			No16		
	Merge zone	Going straight (Lane keep)	No17		No18		No19		No20		No21		No22							
		Lane change	No23		No24		No25		No26		No27		No28							
	Branch zone	Going straight (Lane keep)	No29		No30		No31		No32		No33		No34							
		Lane change	No35		No36		No37		No38		No39		No40							
	Intersection	Going straight (Lane keep)	No41		No42		No43		No44		No45		No46		No47		No48		No49	
		Turning	No50		No51		No52		No53		No54		No55		No56		No57		No58	

図 23. 一般車両の交通外乱シナリオ



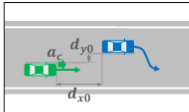
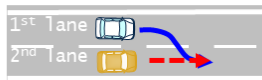
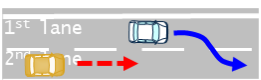
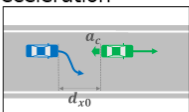
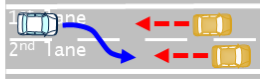
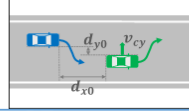

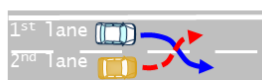


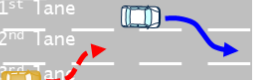
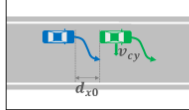


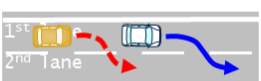

Ego :  Other: 	Main road 2 lanes <div> <div>1st lane</div> <div>2nd lane</div> </div>			Main road 3 lanes <div> <div>1st lane</div> <div>2nd lane</div> <div>3rd lane</div> </div>		
	Forward	Parallel running	Rear	Forward	Parallel running	Rear
No.9 Acceleration 	No trajectory intersects, it doesn't affect any safety			No trajectory intersects, it doesn't affect any safety	No trajectory intersects, it doesn't affect any safety	No trajectory intersects, it doesn't affect any safety
No.10 Deceleration 	※2 pattern 	No trajectory intersects, it doesn't affect any safety	No trajectory intersects, it doesn't affect any safety	No trajectory intersects, it doesn't affect any safety	No trajectory intersects, it doesn't affect any safety	No trajectory intersects, it doesn't affect any safety
No.12 LC in the opposite direction 			No trajectory intersects, it doesn't affect any safety			
No.13 LC in the same direction 					No trajectory intersects, it doesn't affect any safety	No trajectory intersects, it doesn't affect any safety

図 24. 周囲の車両位置と自車の障害となる可能性のある運動の組み合わせたシナリオ例

3.4.1.6. 二輪車特有のシナリオ

一般に、前節で示した周囲車両の位置および動作の分類(図 21、図 22)は、四輪車・二輪車・自転車に適用できる。日本においては、自転車は原則として道路の左側を走行するが、道路形状によっては(例:車線のない狭い道路)右側を走行するケースも一般的に見られる。そのため、自転車についても基本的には一般車両と同様の挙動を取ると考えられる。

ただし、二輪車には固有の特徴がある。特に、自車と同一車線内の狭いスペースを走行する可能性があり、この場合には追加的な安全評価シナリオを設定する必要がある。これらのシナリオは、各国の法規や道路交通規則に依存し、該当する国においてのみ発生し得るものである。

具体的なシナリオ例や評価手順の詳細については、Annex B 二輪車特有のシナリオに記載している。

3.4.1.7. 交通外乱の複合的シナリオへのアプローチ

本稿で定義した交通外乱シナリオ構造は、自車と1~2台の周囲車両との関係をカバーしている。しかし、実際の交通環境では多数の交通参加者が同時に多様な挙動を示すため、複合的なシナリオを考慮する必要がある。

本アプローチでは、複雑な状況を一連のシーケンスに分解することで、安全分析に適用可能な形に整理する。例えば、以下のようなケースが考えられる(図 25)。

- ・ 先行車両が急減速(第1動作)
- ・ これに対して自車が回避行動を実施(第2動作)
- ・ さらに回避エリアに、別の車両がカットインしてくる可能性がある

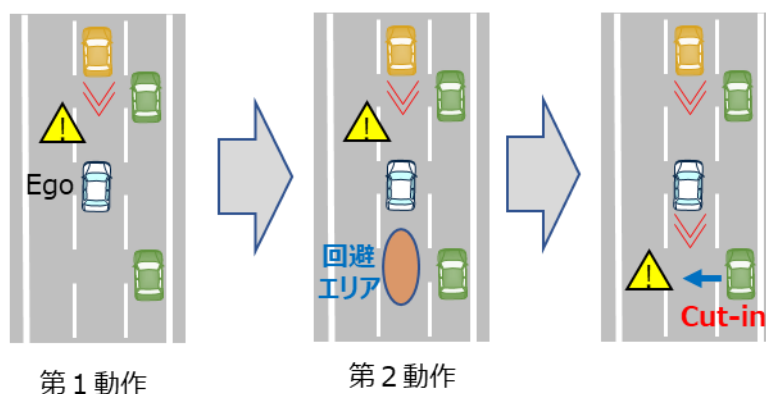


図 25 複合的シナリオのシーケンス

このように、単独の事象ではなく一連の挙動の組合せとして交通外乱を抽出することで、現実には即したシナリオ群を導出できる。また、これらのシナリオを考える際には、道路環境の影響(例:主要道路、合流レーン、交差点等)も考慮することで、多様な交通流シナリオの生成が可能となる。

複合的シナリオの具体例や展開方法の詳細については、Annex C 交通外乱の複雑なシナリオへのアプローチを参照のこと。

3.4.1.8. 交通弱者(歩行者)シナリオ

一般車両シナリオと同様に交通弱者(歩行者)シナリオも交通外乱シナリオ構造(図 18)に従い、「道路環境」、「自車両挙動」、「他交通参加者(位置・挙動)」のアイテムについて検討できる。ここでは他交通参加者は歩行者にあたり、歩行者の位置や挙動は無数に存在するが、過度に細分化すると網羅性の論証が困

難になるため、一定の抽象度をもった項目に整理することが必要である。その結果得られた交通弱者（歩行者）の Functional Scenario 構成要素を

表 2 に示す。

表 2 交通弱者（歩行者）シナリオ (Functional Scenario) の構成要素

構成要素	アイテム	備考
道路環境	Non intersection, Intersection	Merge, Branch は不要
自車両挙動	Non intersection: Go straight, Lane change intersection: Go straight, Turn	一般車両シナリオと同様
他交通参加者（歩行者）行動	On driving path, Into driving path	道路上/道路外からの侵入

道路環境は一般に合流・分岐車線やラウンドアバウト等も存在するが、歩行者とのインタラクション評価においては交差路に集約しても支障はない。従って単路 (Non intersection)・交差路 (Intersection) のみをアイテムとした。

自車両挙動は、単路における直進 (Go straight) と車線変更 (Lane change) 及び交差路における直進 (Go straight) と車線変更 (Turn) に整理した。なお、スワッピングは回避行動と考えるため本構成要素から除外する。また、単路における駐車場進入などの旋回は交差路での Turn と同様の扱いとする。

最後に他交通参加者（歩行者）の行動は、自車両の進行経路 (Driving path) との関係に基づき、On driving path と Into driving path の2種類に分類する (図 26)。

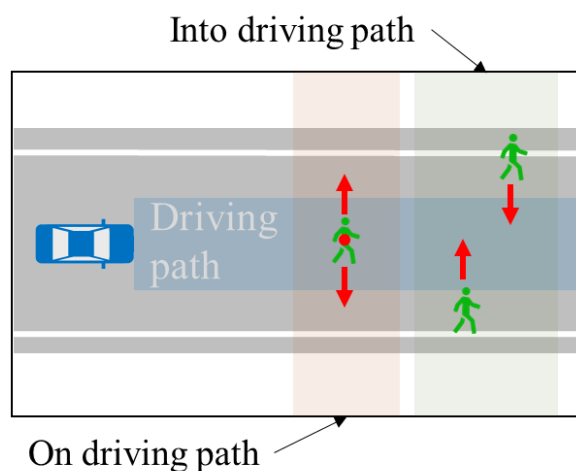


図 26 On driving path, Into driving path の概要

ここで、On driving path とはシナリオ開始時点で歩行者が自車両の進行経路 (Driving path) 上に存在する場合であり、Into driving path はシナリオ開始時点で歩行者が進行経路外に存在し、その後進入してくる場合である。以上より、他交通参加者（歩行者）シナリオ (Functional Scenario) は 8 シナリオで構成される (図 27)。また、図中のパラメータを表 3 に示す。



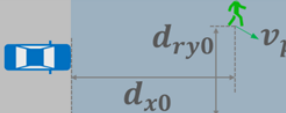
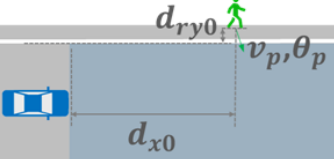
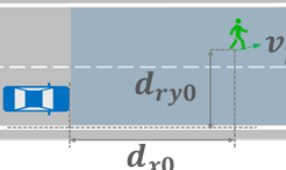
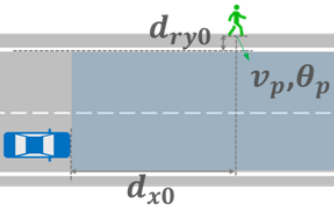
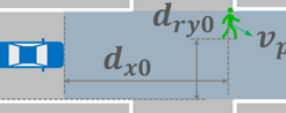
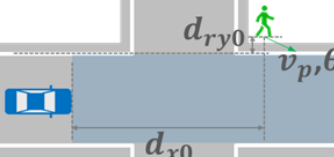
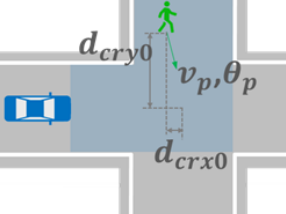
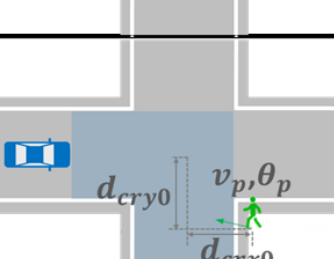
<div>  Ego vehicle  Pedestrian </div>			Pedestrian behavior	
			On driving path	Into driving path
Road geometry and Ego vehicle behavior	Non intersection	Go straight		
		Lane change		
	Intersection	Go straight		
		Turn		

図 27 交通弱者(歩行者)の交通外乱シナリオ

表 3 交通弱者(歩行者)の交通外乱シナリオパラメータ

パラメータ	単位	説明
v_p	m/s	歩行者の進行方向速度
v_v	m/s	自車両の進行方向速度
d_{x0}	m	インタラクション開始時の自車両との歩行者との距離(縦)
d_{ry0}	m	インタラクション開始時の自車両との歩行者との距離(横)
θ_p	rad	自車両の初期進行方向を基準とした歩行者の進行角度(反時計方向)

ここで Logical scenario を定義する上で必要となる歩行者の行動について述べる。

On driving path における歩行者の行動は「停止」「Driving path の左方向に移動」「Driving path の右方向に移動」の三つの行動でまとめられる。なお、自車両の進行方向の前後方向については、縦方向の相対速度は自車両の進行速度と大きく変わらないと仮定し「停止」と同様にまとめる。

Into driving path における歩行者の行動は「Driving path の左方向に移動」「Driving path の右方向に移動」の二つの行動でまとめ、Driving path 外側で停止の場合は Critical な場面にならないため考慮する必要がない。

また、一般車両同様に本シナリオの網羅性は実事故データとの比較検証により確認した(Annex D 事故データに基づく交通流外乱シナリオ体系の網羅性検証 参照)。

3.4.2. 認識外乱シナリオ

認識外乱シナリオには、認識外乱の他に、死角シナリオ及び通信外乱シナリオも含まれる(図 28)。

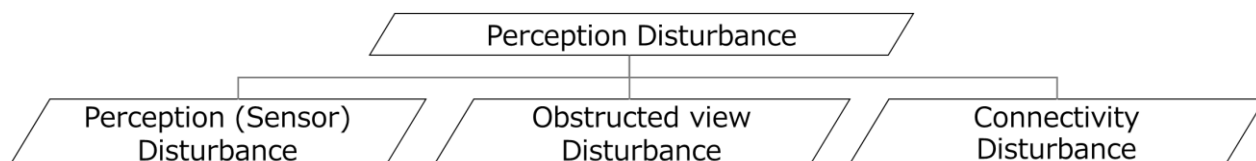


図 28. 認識外乱シナリオの分類

3.4.2.1. 認識外乱シナリオ

認識外乱シナリオは、外乱を引き起こす要因および外乱を生じるセンサの原理に基づいて生成される。外乱の要因は多岐にわたるが、発生原理に基づいて要因を分類し、同一の分類となるものの中からその代表要因を選ぶことで、認識外乱全体を包含するシナリオ群を選出することができる。さらに、選出された各外乱要因について発生原理に基づき必要な組み合わせを考慮すれば、認識外乱の組み合わせ評価シナリオも生成することができる。(図 29)。本稿では、ミリ波レーダ・LiDAR・カメラの 3 種類のセンサについて認識外乱シナリオを記述する。

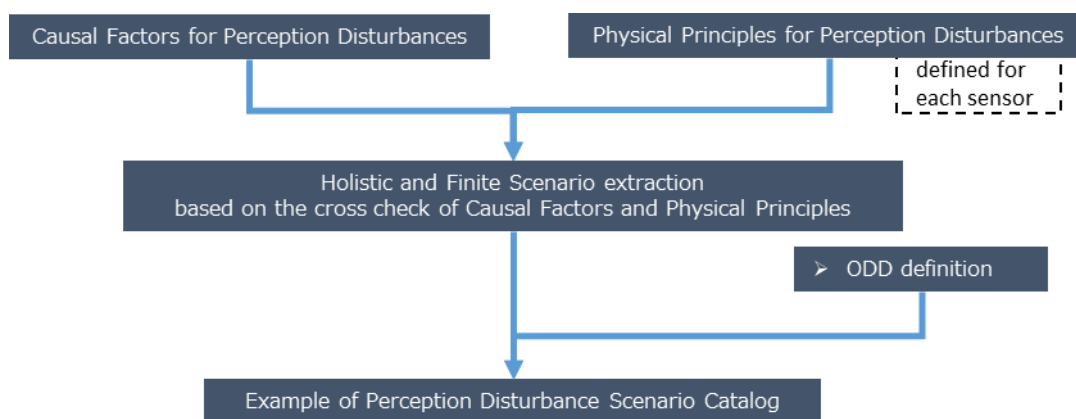


図 29. 認識外乱要因とセンサ原理とに基づいたシナリオ導出プロセス

3.4.2.2. 認識外乱要因

認識外乱の要因は、まず自車両との位置関係から「車両・センサ」、「周辺環境」および「認識対象物」の 3 つに大別でき(図 30)、それぞれがさらに詳細に且つ、各階層において網羅的に分解・分類されて認識外乱要因体系を構成する(図 31)。ここでは例えば、構造、相対位置、種別などの視点で要因をブレイクダウンしていき、最終的には色、形状、材質、挙動などの階層まで分類を続けていく。

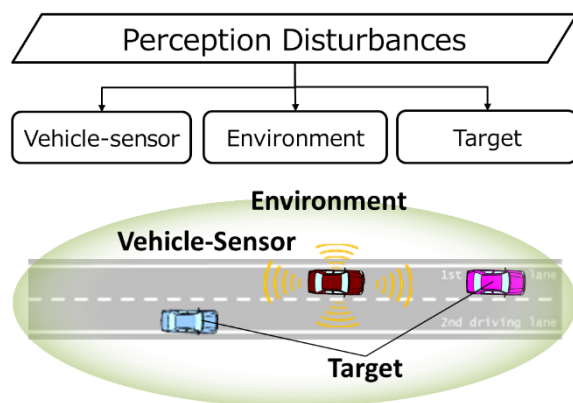


図 30. 自車両との位置関係による認識外乱要因の大分類

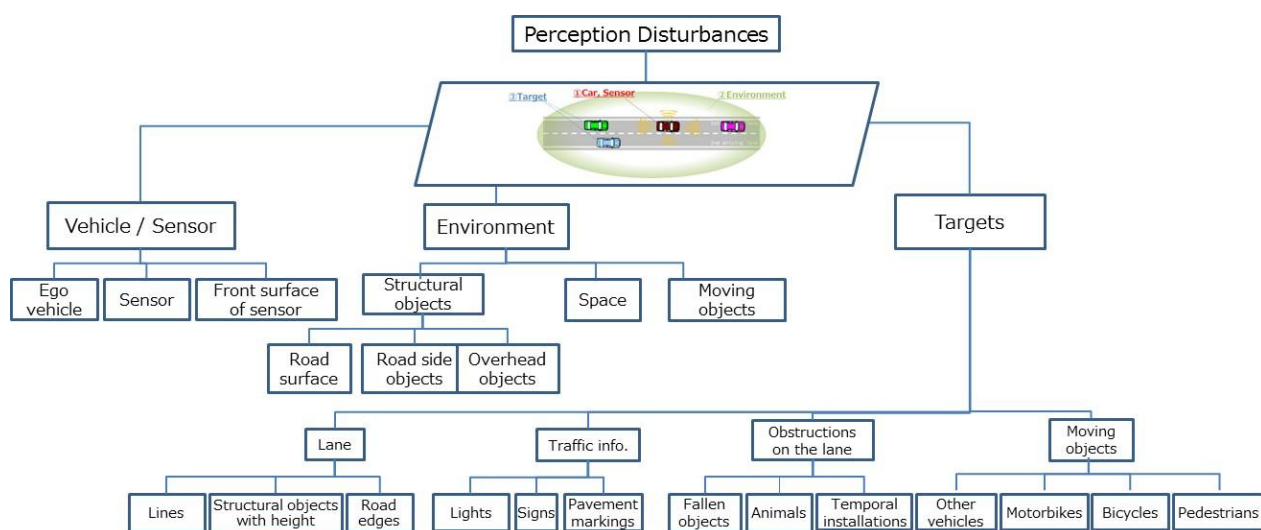


図 31. 認識外乱要因の体系図

3.4.2.2.1. 認識外乱要因:車両・センサ

「車両・センサ」に分類される認識外乱要因は、その要因が存在する位置により「a.自車両」、「b.センサ」および「c.センサ前面」の3つに分解される(図 32)。

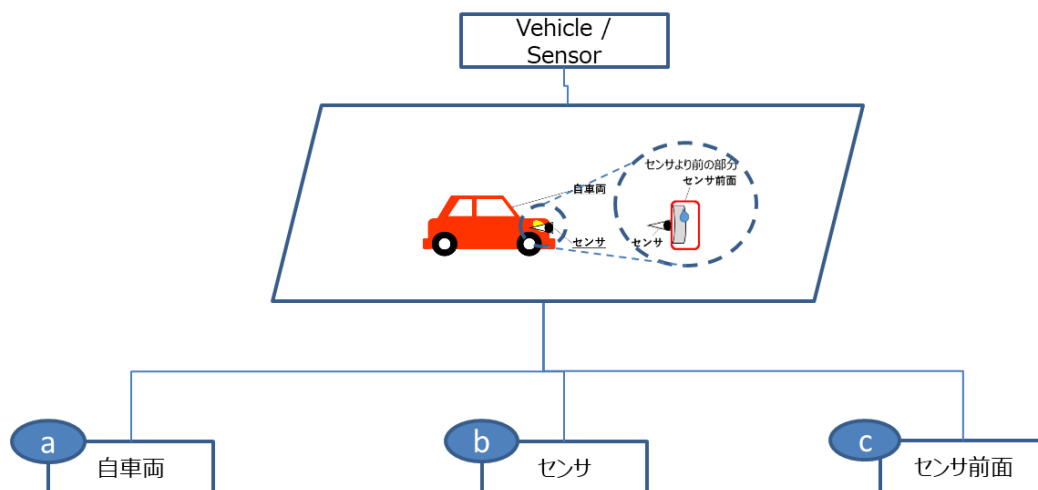


図 32. 車両・センサの分類

図 32 中の a, b, c それぞれに分類される認識外乱要因の詳細を、表 4～表 6 に示す。これらの表では、各センサにおける認識外乱要因の詳細分類・認識性能への影響・認識外乱の発生原理がそれぞれ記述されている。

表 4 「a.自車両」の外乱要因

a 自車両

		Millimeter waves	LIDAR	Camera
Influence on sensor principle	Class.	車両姿勢変化		
	Influence	<ul style="list-style-type: none"> レーダの方向が変わることによる方位精度の低下 レーダの方向が変わることによるFOV変化 路面を障害物として誤認識 	路面を障害物として誤認識 LiDARは車体に固定して取付けられることが想定されている。そのため、車両姿勢の変化により視野が影響を受ける。	搭載位置・向きの変化により測位精度低下 映像の上下動による認識率低下 旋回等で画像が大きく流れ認識率低下
	Principle	低S/N 低D/U U増大	車両姿勢	(車両システム) 画像ブレ・流れ

表 5 「b.センサ」の外乱要因

b センサ

Influence on sensor principle	Class.	Millimeter waves		LiDAR		Camera	
		搭載ばらつき	センサ本体の不調	搭載ばらつき	センサ本体の不調	搭載ばらつき	センサ本体の不調
	Influence	<ul style="list-style-type: none"> ・死角の発生 ・直接波と内部反射波の干渉による方位精度の低下 ・軸ズレによる方位精度の低下 	<ul style="list-style-type: none"> ・受信強度低下による最大検知距離低下 ・センサの特性変化に伴う位相、周波数変化 	<ul style="list-style-type: none"> ・死角の発生 ・光軸、搭載位置による角度ズレ 	<ul style="list-style-type: none"> ・光路に使用される部品の経年劣化ともなう着しい透過効率低下が生じた場合、出射光量や受信できる反射光量が低下し性能が低下する。 	<ul style="list-style-type: none"> センサ検知範囲異なり死角が発生 光軸、搭載位置による測位精度低下 	<ul style="list-style-type: none"> 設計誤差以上に画像上の位置や色味がずれる レンズ歪みによる認識率・測位精度低下 レンズ鏡筒内反射の影響で認識率低下 レンズ周辺減光により認識率低下 画素欠陥で画像上の一部情報欠損 イメージセンサ性能劣化(熱雑音、感度特性) 演算性能限界で認識率低下
Principle	Influence	伝搬遅延変化 屈折 低S/N 低D/U U増大	周波数変化、屈折 伝搬遅延変化 折り返し 高調波 低S/N、U増大	遮蔽によるS無し Sの飽和・Sの減衰 多重反射・屈折 認識対象外からの信号(反射) 認識対象外からの信号(屈折)	Sの減衰	S無し(部分的) (認識)	S変化 屈折、反射、S弱すぎ S無し(部分的) S/N低下 (認識)

表 6 「c.センサ前面」の外乱要因

c センサ前面

Influence on sensor principle	Class.	Millimeter waves		LiDAR		Camera	
		付着物	特性の変化	付着物	特性の変化	付着物・障害物	特性の変化
	Influence	<ul style="list-style-type: none"> ・受信強度低下による最大検知距離低下 ・付着物での反射波と直接波の干渉による方位精度の低下 	<ul style="list-style-type: none"> ・受信強度低下による最大検知距離低下 ・センサ前面の特性変化での反射波と直接波の干渉による方位精度の低下 	<ul style="list-style-type: none"> 受信信号強度低下により、最大検知距離の低下 付着物を検出することによる信号飽和 センサ付着物(油膜等)による角度ズレ 	<ul style="list-style-type: none"> 透過率の低下による受信信号強度の低下。 白濁等によってセンサ前面を検出する事による信号飽和。 センサ前面の歪みによる角度ズレ。 	<ul style="list-style-type: none"> フロントガラス付着物による映像欠落で認識率低下 ワイパによる遮蔽で認識率低下 雨滴、ワイパ等のノイズで、認識率低下。 遠方車両が雨滴と重なって、最大検知距離が低下。 	<ul style="list-style-type: none"> 設計誤差以上に画像上の位置や色味がずれる フロントガラスによる歪みによる認識率、測位精度低下 フロントガラスの破損による認識率低下
Principle	Influence	伝搬遅延変化 屈折 低S/N	伝搬遅延変化 屈折 低S/N	Sの減衰・屈折・遮蔽によるS無し 認識対象外からの信号(反射) 認識対象外からの信号(屈折)	Sの減衰・屈折・遮蔽によるS無し 認識対象外からの信号(反射) 認識対象外からの信号(屈折)	S無し(部分的) 低S/N 屈折	S変化 屈折 S無し(部分的) 低S/N

3.4.2.2.2. 認識外乱要因: 周辺環境

「周辺環境」に分類される認識外乱要因は、自車周辺に存在するものの性状から「d.周辺構造物」、「e.空間」および「f.周辺移動物」の3つに分解され、「d.周辺構造物」については自車との位置関係に基づき、さらに「d-1.路面」、「d-2.路側構造物」および「d-3.上方構造物」の3つに分解される(図 33)。

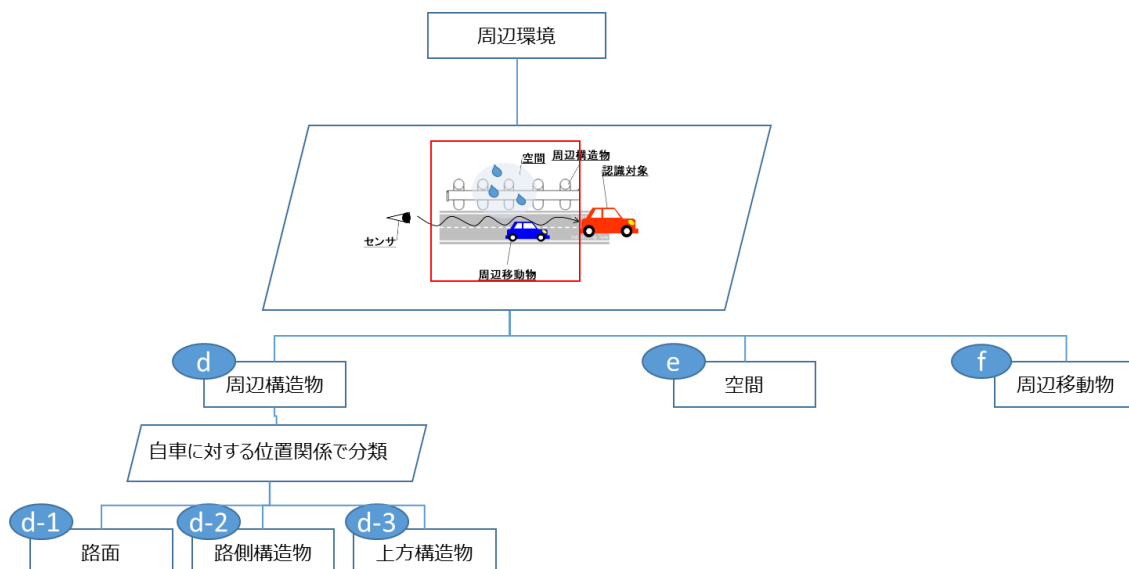


図 33. 周辺環境の分類

図 33 中の d-1, d-2, d-3, e, f それぞれに分類される認識外乱要因の詳細分類・認識性能への影響・認識外乱の発生原理を、表 7~表 11 に示す。

表 7 「d-1. 路面」の外乱要因

		Millimeter waves			LIDAR			Camera		
Influence on sensor principle	Class	形状	路面状態	材質	形状	路面状態	材質	形状	路面状態	材質
	Influence	<ul style="list-style-type: none"> 道路勾配により前遠方車両がFOVから外れる 道路勾配により前遠方車両が消失/出現する 勾配路面を前方静止物と認識する 	<ul style="list-style-type: none"> 路面の反射特性の変化により路面マルチパスが変化し信号強度が低下する 路面からのクラッタが上昇する 	<ul style="list-style-type: none"> 路面の反射特性の変化により路面マルチパスが変化し信号強度が低下する 路面からのクラッタが上昇する 	<ul style="list-style-type: none"> 道路勾配により前遠方車両がFOVから外れる 道路勾配により前遠方車両が消失/出現する 勾配路面を前方静止物と認識する 	<ul style="list-style-type: none"> 路面にアイス/スノーや水たまりなど反射特性の高い状態の時、偽点が発生 	<ul style="list-style-type: none"> 反射特性の違いにより、路面の一部を検出し、障害物と誤認。 	<ul style="list-style-type: none"> 下り手前で視界から外れて、未検知 上り手前で対象物の形状変化 カントによる画像上の傾きの変化 	<ul style="list-style-type: none"> 水たまり等への映り込みを誤認識。 道路修復後や轍、影を誤認識 	<ul style="list-style-type: none"> マンホールなどを落下物と誤認識する。 横断方向のつなぎ目を停止線と誤認識する。 路面標識を区画線と誤認識
	Principle	低D/U U増大 低S/N	低D/U U増大	低D/U U増大	認識要因	反射 多重反射	認識要因	S無し(部分的) (認識)	S変化 反射 低D/U、低S/N (認識)	低D/U 低S/N (認識)

表 8「d-2. 路側構造物」の外乱要因

d-2 路側構造物

	Class.	Millimeter waves			LiDAR			Camera		
		反射	遮蔽	背景	反射	遮蔽	背景	反射	遮蔽	背景
	Influence	・マルチパスによるゴースト発生 ・FOV外の物標の折返しゴースト発生 ・同一距離複数物標時に水平方位精度の悪化	・側壁等によるFOVの一部欠損		反射して見える物体を誤認識 路側にある反射率の高い物体(デリニエータ等)を車両と誤認識	対象物の前に存在する物体が対象物の一部を隠す		反射して見える物体を誤認識 反射率の高い物体の見かけの変化で誤認識	対象物の前に存在する物体が対象物の一部を隠す 透明物の影響で対象物が見えづらい、あるいは色に変化	対象と背景のコントラスト不足 背景を対象物と誤る
Principle		反射(間接波)折返し 低D/U U増大	S無し(部分的) 低S/N		反射 多重反射 認識要因	遮蔽によるS無し		反射 S変化	S無し(部分的) S変化	低D/U (認識)

表 9「d-3. 上方構造物」の外乱要因

d-3 上方構造物

	Class.	Millimeter waves			LiDAR			Camera		
		反射	遮蔽	背景	反射	遮蔽	背景	反射	遮蔽	背景
	Influence	・垂直方位分解能不足	対象物の前に存在する物体が対象物の一部を隠す		カーブなどに設置されたミラーは非常に高い指向性を持つ反射特性のため、ミラー自体の検出ではなく反射光が照射された物質を誤検出する可能性がある。 上方にある反射率の高い物体(方面看板等)を車両と誤認識	対象物の前に存在する物体が対象物の一部を隠す		反射して見える物体を誤認識 反射率の高い物体の見かけの変化で誤認識	対象物の前に存在する物体が対象物の一部を隠す 透明物の影響で対象物が見えづらい、あるいは色に変化	対象と背景のコントラスト不足 背景を対象物と誤る
Principle		U増大	S無し(部分的)		反射 多重反射 認識要因	遮蔽によるS無し		反射 S変化	S無し(部分的) S変化	低D/U (認識)

表 10 「e. 空間」の外乱要因

e 空間

		Millimeter waves		LiDAR		Camera	
		空間障害物	空間中の電波・光	空間障害物	空間中の電波・光	空間障害物	空間中の電波・光
	Influence on sensor principle	<ul style="list-style-type: none"> 受信強度低下による最大検知距離低下 飛来物によるFOVの一部または全部欠損 飛来物を認識対象物と誤認識 	<ul style="list-style-type: none"> 干渉によるノイズフロアの上昇 干渉信号を認識対象物からの反射と誤認識 	<ul style="list-style-type: none"> 天候による空間障害物の影響確認 雨などは光路上の障害物となるため、反射光の低下による測距性能劣化が想定される 	<ul style="list-style-type: none"> 西日、逆光等で黒つぶれが発生 背景光増加によるノイズ増加 他社LiDARによるパルス状ノイズ 	<ul style="list-style-type: none"> 空間障害物による対象物の隠れ 半透明空間障害物の向こう側の色等の変化 反射性空間障害物の色等の変化 雨、雪による画像ノイズ、コントラスト低下で認識不良 飛来物を別の障害物と誤認識 	<ul style="list-style-type: none"> 薄暮、夜間で光量不足により認識率低下 局所的に光源が強く白飛びが発生 西日、逆光等で黒つぶれが発生 光源の色で対象・背景の色が変化 光源の影響で対象物のコントラスト低下 強い光源(逆光)でフレア・スミアが発生
	Principle	Sなし(部分的) 低S/N U増大	低D/U U増大	Sの減衰 遮蔽によるS無し 認識対象外からの信号(反射) 認識対象外からの信号(屈折) 認識要因	DC的なノイズ パルス状のノイズ 認識要因	S無し(部分的) S変化 低D/U 低S/N (認識)	S弱すぎ S強すぎ S強度差大 S変化 低D/U 低S/N

表 11 「f. 周辺移動物」の外乱要因

f 周辺移動物

		Millimeter waves			LiDAR			Camera		
		反射	遮蔽	背景	反射	遮蔽	背景	反射	遮蔽	背景
	Influence on sensor principle	<ul style="list-style-type: none"> グレーティング/高調波/位相雑音/サイドローブによるゴースト発生 強反射の周辺にある反射信号の精度低下 			<ul style="list-style-type: none"> 表面の反射による偽点の発生 			<ul style="list-style-type: none"> 鏡面仕上げの塗装への映り込みを誤認識 光沢性のある塗装への映り込みを誤認識 		<ul style="list-style-type: none"> 対象物と類似した色合いで対象の認識率低下 形状が対象物と干渉
	Principle	折返し 高調波 低D/U U増大			反射 多重反射 認識要因			反射 S変化		低D/U (認識)

3.4.2.2.3. 認識外乱要因: センサの認識対象

「センサの認識対象」に分類される認識外乱要因は、認識すべき情報の種別から、「g. 走路」、「h. 交通情報」、「j. 路上障害物」および「k. 移動物」に大別される(図 34)。

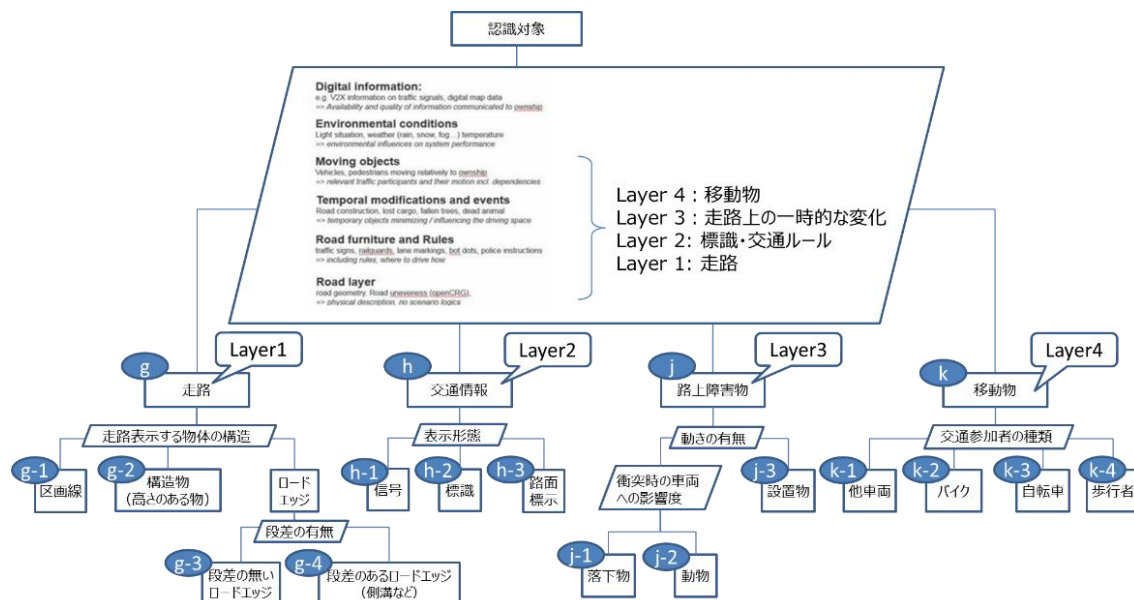


図 34. センサ認識対象の分類

図 34 中の「g. 走路」は、その場所が走路であることを示す物体の構造から、「g-1. 区画線」、「g-2. 高さのある構造物」とロードエッジとに分類され、ロードエッジはさらに段差の有無で g-3 と g-4 とに分類される(図 35)。

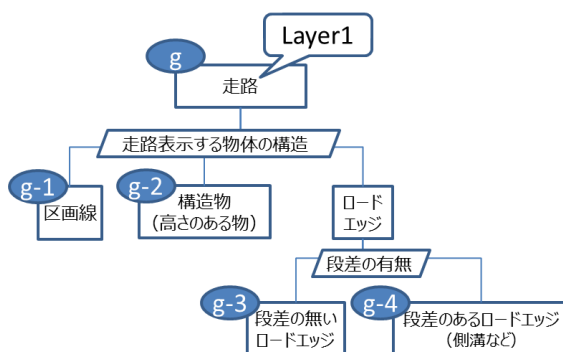


図 35. 「g. 走路」の分類

図 34 中の「h. 交通情報」は、その表示形態の違いから、「h-1. 信号」、「h-2. 標識」および「h-3. 路面標示」に分類される(図 36)。

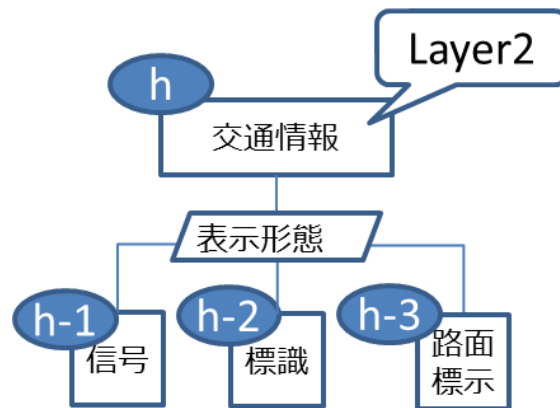


図 36. 「h. 交通情報」の分類

図 34 中の「j. 路上障害物」は、動きの有無および車両と衝突した場合の影響度の大きさから、「j-1.落下物」、「j-2.動物」および「j-3.設置物」に分類される(図 37)。

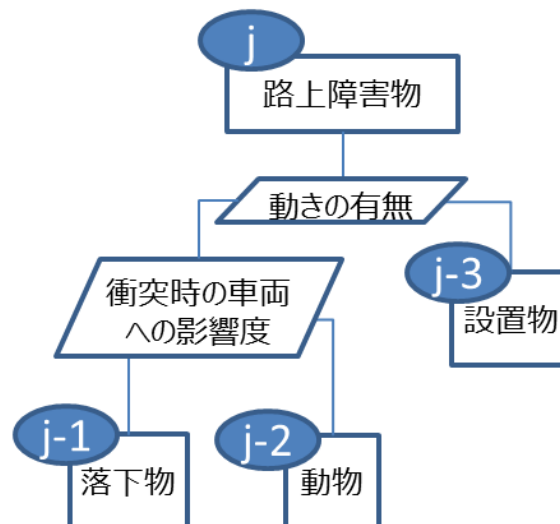


図 37. 「j. 路上障害物」の分類

図 34 中の「k. 移動物」は、交通参加者の種類として「k-1.他車両」、「k-2.バイク」、「k-3.自転車」および「k-4.歩行者」に分類される(図 38)。

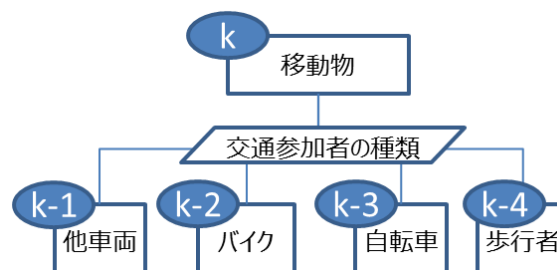


図 38. 「k 移動物」の分類

g-1 ～ k-4 それぞれに分類される認識外乱要因の詳細分類・認識性能への影響・認識外乱の発生原理を、表 12～表 25 に示す。

表 12 「g-1. 区画線」の外乱要因

		Millimeter waves	LiDAR				Camera			
Class.	Influence on sensor principle	Class.	色・材質	形状	汚れ・損れ	相対位置	色・材質	形状	汚れ・損れ	相対位置(*)
			・周辺路面と反射強度のコントラスト不足で認識不良発生 ・認識想定外の反射強度の影響で検知・認識不良発生	・認識想定外の形状（太さ、間隔、構造物の外観(破損含む)など）で検知・認識不良発生	・隠れているものは撮像できず未認識 ・損れ・汚れによって認識率低下 ・消した後を誤認識	・自車移動による認識対象の位置ずれ	・周辺路面とのコントラスト不足で認識不良発生 ・認識想定外の明度・彩度・色相の影響で検知・認識不良発生	・認識想定外の形状（太さ、間隔、構造物の外観(破損含む)など）で検知・認識不良発生	・隠れているものは撮像できず未認識 ・損れ・汚れによって認識率低下 ・消した後を誤認識	・（走行中において）画像流れが大きく認識不良 ・画像周辺部の歪みの影響で認識不良
			認識要因	認識要因	Sの減衰 遮蔽によるS無し	空間全体の位置ずれ 認識要因	低D/U (認識)	(認識)	S無し（部分的） 低S/N	画像ブレ・流れ (認識)

表 13 「g-2. 構造物(高さのある物)」の外乱要因

		Millimeter waves				LiDAR				Camera			
Influence on sensor principle	Class.	色・材質	形状	汚れ	相対位置	色・材質	形状	汚れ	相対位置	色・材質	形状	汚れ	相対位置
		・材質により反射強度が低下	・形状／大きさ／向きにより、反射強度が低下あるいは増加	・汚れにより、反射強度低下	・FOVの端で信号強度が低下	・材質により反射強度が低下あるいは増加	・形状／大きさ／向きにより、反射強度が低下あるいは増加	・汚れにより、反射強度低下	・自車移動による認識対象の位置ずれ	・背景とのコントラスト不足で認識不良発生 ・壁の絵や模様で検知・認識不良発生	・認識想定外の形状で検知・認識不良発生	・汚れや模様等を物体と誤認識	・（走行中において）画像流れが大きく認識不良 ・画像周辺部の歪みの影響で認識不良
		低S/N	折返し 高周波 S強度差大 低D/U 低S/N	低S/N	低S/N	Sの減衰 Sの飽和	Sの減衰 Sの飽和	Sの減衰	空間全体の位置ずれ 認識要因	低D/U （認識）	低S/N （認識）	低S/N	画像ブレ・流れ （認識）

表 14 「g-3. 段差の無いロードエッジ」の外乱要因

		Millimeter waves				LIDAR				Camera			
Influence on sensor principle	Class.	色・材質	形状	汚れ	相対位置	色・材質	形状	汚れ	相対位置	色・材質	形状	汚れ	相対位置
	Influence	・材質により反射強度が低下	・形状／大きさ／向きにより、反射強度が低下	・汚れにより、反射強度低下	・FOVの端で信号強度が低下	・反射強度の異なる路面をロードエッジと誤認識	・形状／大きさ／向きにより、反射強度が低下	・積雪・落ち葉などで隠れにより認識不良	・白車移動による認識対象の位置ずれ	・色の異なる路面をロードエッジと誤認識	・走行すべき範囲外の路面形状が認識想定外	・積雪・落ち葉などで隠れにより認識不良	・（走行中において）画像流れが大きく認識不良 ・画像周辺部の歪みの影響で認識不良
	Principle	低S/N	低S/N	低S/N	低S/N	認識要因	Sの減衰	Sの減衰 遮蔽によるS無し	空間全体の位置ずれ 認識要因	低D/U（認識）	低D/U（認識）	S無し（部分的）	画像ブレ・流れ（認識）

表 15 「g-4. 段差のあるロードエッジ」の外乱要因

		Millimeter waves				LIDAR				Camera			
Influence on sensor principle	Class.	色・材質	形状	汚れ	相対位置	色・材質	形状	汚れ	相対位置	色・材質	形状	汚れ	相対位置
	Influence	・材質により反射強度が低下	・形状／大きさ／向きにより、反射強度が低下	・汚れにより、反射強度低下	・FOVの端で信号強度が低下	・材質により反射強度が低下	・形状／大きさ／向きにより、反射強度が低下あるいは増加	・汚れにより、反射強度低下	・白車移動による認識対象の位置ずれ	・ロードエッジ部分のコントラスト不足で認識不良発生	・凹みの端や段差が小さく見えにくい ・走行すべき範囲外の路面形状が認識想定外	・積雪・落ち葉などで隠れにより認識不良	・（走行中において）画像流れが大きく認識不良 ・画像周辺部の歪みの影響で認識不良
	Principle	低S/N	低S/N	低S/N	低S/N	Sの減衰	Sの減衰 Sの飽和	Sの減衰	空間全体の位置ずれ 認識要因	低D/U（認識）	低D/U（認識）	S無し（部分的）	画像ブレ・流れ（認識）

表 16 「h-1. 信号」の外乱要因

Influence on sensor principle	Class.		Camera				
	Millimeter waves	LiDAR	色・材質	形状	光源	汚れ	相対位置
	Influence	Influence	・認識想定外の明度・彩度・色相の影響で検知・認識不良発生	・信号の縦型・横型による認識率低下 ・サイズの違い（LED型は小さい）による認識率低下 ・フードの影響を適切に取り扱えず誤認識	・ブロッカの影響で認識率低下 ・光源の指向性により（信号の相対的な向きとの関係で）認識率低下	・雪などで隠れているものは撮像できず検出不良発生	・信号の指向性で点灯の判別を誤る ・一部FOV外となり不検知 ・方位による見かけやレンズ歪に伴う形状の変化による不検知 ・方位により認識すべき信号を誤る
Principle			（認識）	（認識）	ブロッカ 低S/N	S無し（部分的）	低S/N S無し（部分的） （認識）

表 17 「h-2. 標識」の外乱要因

Influence on sensor principle	Class.		Camera				
	Millimeter waves	LiDAR	色・材質	形状	光源	汚れ	相対位置
	Influence	Influence	・周辺路面とのコントラスト不足で認識不良発生 ・認識想定外の明度・彩度・色相の影響で検知・認識不良発生	・類似形状の文字・数字を誤認識 ・仕向地によって、標識の形状が異なり認識率低下	・電光掲示板標識の撮影に伴うブロッカにより、画像の一部情報が欠落し検知・認識不良発生	・埃れ・汚れによる画像欠落、画像の干渉によって認識率低下	・画像流れが大きく認識不良 ・向きによる形状変化で認識不良 ・位置関係で自車に適用しない標識を自車向けと誤認識
Principle			低D/U （認識）	（認識）	ブロッカ	低S/N	画像ブレ・流れ S無し（部分的） （認識）

表 18 「h-3. 路面標示」の外乱要因

		Millimeter waves	LIDAR	Camera			
Influence on sensor principle	Class.			色・材質	形状	汚れ	相対位置
	Influence			・周辺路面とのコントラスト不足で認識不良発生 ・認識想定外の明度・彩度・色相の影響で検知・認識不良発生	・認識想定外の形状（未知の表示、太さ、間隔など）で検知・認識不良発生 ・画像の形状により空間形状の誤認識	・隠れているものは撮像できず未認識 ・擦れ・汚れによって認識率低下 ・消した後を誤認識	・《走行中において》画像流れが大き く認識不良
	Principle			低D/U （認識）	（認識）	S無し（部分的） 低S/N	画像ブレ・流れ S無し（部分的） （認識）

表 19 「j-1. 落下物」の外乱要因

		Millimeter waves			LIDAR			Camera		
Influence on sensor principle	Class.	色・材質	形状・大きさ	相対位置・挙動	色・材質	形状・大きさ	相対位置・挙動	色・材質	形状・大きさ	相対位置・挙動
	Influence	・受信強度低下による最大検知距離低下 ・受信強度のバラつきによる誤認識	・形状／大きさ／向きにより、反射強度低下	・FOVの端で信号強度が低下 ・風等による移動、転がる落下物を誤認識	・材質により反射強度が低下あるいは増加	・形状／大きさ／向きにより、反射強度低下	・自車移動による認識対象の位置ずれ	・背景に類似しコントラスト低下で未認識 ・鏡面による反射画像で認識不良 ・発光体による点滅で認識不良 ・発光体・反射材とそれ以外の部分で明暗が大きく認識不良	・FOV内に入る画像情報量の制限 ・見かけの形状や大きさにより認識率低下	・移動により画像ブレ・流れが発生し認識率低下 ・近距離周辺部では画像流れが大きき認識率低下 ・FOVに入る部分が少なく認識率低下
	Principle	低S/N	低S/N	低S/N （認識）	Sの減衰 Sの飽和 反射 多重反射	Sの減衰	空間全体の位置ずれ 認識対象の位置ずれ 認識要因	低D/U、反射、 フリッカ、S強度差大（認識）	S無し（部分的） （認識）	画像ブレ・流れ S無し（部分的） （認識）

表 20 「j-2. 動物」の外乱要因

j-2 動物									
Influence on sensor principle	Class.	Millimeter waves		LiDAR			Camera		
		形状・大きさ	相対位置・挙動	色・材質	形状・大きさ	相対位置・挙動	色・材質	形状・大きさ	相対位置・挙動
		・体格、体勢により、反射強度低下	・FOVの端で信号強度が低下 ・動物の挙動により認識不調発生	低反射率による受信信号の低下	動物の種類、向きや大きさ 姿勢により反射面積に変化による影響	・自車または認識対象の移動による位置ずれ	背景に類似したコントラスト 低下で未認識 発光体による点滅で認識不良 発光体・反射材とそれ以外の部分で明暗が大きく認識不良	・FOV内に入る画像情報の制限 ・見かけの形状や大きさにより認識率低下	・高速の横断で画像ブレ発生 ・動物の集団行動で、認識率低下
Principle	—	低S/N	低S/N (認識)	Sの減衰 反射 多重反射	Sの減衰	空間全体の位置ずれ 認識対象の位置ずれ 認識要因	低D/U、 フリッカ、S強度差大 (認識)	S無し(部分的) (認識)	画像ブレ・流れ S無し(部分的) (認識)

表 21 「j-3. 設置物」の外乱要因

j-3 設置物													
Influence on sensor principle	Class.	Millimeter waves				LiDAR				Camera			
		色・材質	形状・大きさ	汚れ	相対位置	色・材質	形状・大きさ	汚れ	相対位置	色・材質	形状・大きさ	汚れ	相対位置
		・材質により反射強度が低下	・形状／大きさ／向きにより、反射強度が低下あるいは増加	・汚れにより、反射強度低下	・FOVの端で信号強度が低下	・材質により反射強度が低下あるいは増加	・形状／大きさ／向きにより、反射強度が低下あるいは増加	・汚れにより、反射強度低下	・自車移動による認識対象の位置ずれ	・周辺とのコントラスト不足で認識不良発生 ・鏡面等への映り込み画像で認識不良 ・発光体による点滅で認識不良 ・発光体・反射材とそれ以外の部分で明暗が大きく認識不良 ・認識想定外の明度・彩度・色相の影響で検知・認識不良発生	・FOV内に入る画像情報量の制限 ・見かけの形状や大きさにより認識率低下	・汚れによる画像欠落、画像の干渉によって認識率低下	・画像流れが大きく認識不良 ・向きによる形状変化で認識不良
Principle	—	低S/N	折返し 高調波 S強度差大 低D/U 低S/N	低S/N	低S/N	Sの減衰 Sの飽和 反射 多重反射	Sの減衰 Sの飽和	Sの減衰	空間全体の位置ずれ 認識要因	低D/U 反射、フリッカ、S強度差大 (認識)	S無し(部分的) (認識)	低S/N	画像ブレ・流れ S無し(部分的) (認識)

表 22 「k-1. 他車両」の外乱要因

k-1 他車両

		Millimeter waves					LIDAR					Camera				
Influence on sensor principle	Class.	色・材質	部品毎の材質 (塗装・表面性状)	付着物	形状・大きさ	相対位置・挙動	色・材質	部品毎の材質 (塗装・表面性状)	形状・大きさ	付着物	相対位置・挙動	色・材質	形状・大きさ	部品毎の材質 (塗装・表面性状)	相対位置・挙動	付着物
		—														
		・反射強度低下による最大検知距離低下 ・受信強度のバラつきによる誤認識	・反射強度低下による最大検知距離低下 ・受信強度のバラつきによる誤認識	・車両の低反射部位の未検知 ・巨大物標からの強反射	・FOVの端で信号強度が低下 ・車両の挙動により認識不調発生	・材質により反射強度が低下あるいは増加	低反射率による受信信号の低下	ビームに対する反射面積と入射角の影響	物標表面に付着した汚れなどが反射光量に与える影響	・自車または認識対象の移動による位置ずれ	背景に類似しコントラスト低下で未認識	・FOV内に入る画像情報量の制限 ・見かけの形状や大きさにより認識率低下 ・鏡面仕上げの塗装などで、誤認識 ・発光体の点滅で認識不良 発光体・反射材とそれ以外の部分で明暗が大きく認識不良	塗装の反射に依存する認識率低下 ・鏡面仕上げの塗装などで、誤認識 ・発光体の点滅で認識不良 発光体・反射材とそれ以外の部分で明暗が大きく認識不良	・渋滞車両群への高速のアプローチで認識不調発生 ・横から飛び出しの車両で認識不調発生	光の強度低下により、最大検知距離の低下/低反射認識対象物ロス・付着物によるテールランプ隠れなど	
Principle		—	低S/N	低S/N	折返し高調波低S/N	低S/N (認識)	Sの減衰 Sの飽和 反射多重反射	Sの減衰	Sの減衰 Sの飽和	Sの減衰	空間全体の位置ずれ 認識対象の位置ずれ 認識要因	低D/U (認識)	S無し(部分的) (認識)	反射フリッカ、S強度差大、S変化	画像ブレ・流れS無し (部分的)	S無し(部分的) 低S/N

表 23 「k-2. バイク」の外乱要因

k-2 バイク

		Millimeter waves				LiDAR				Camera		
Influence on sensor principle	Class.	色・材質	付着物	形状・大きさ	相対位置・挙動	色・材質	形状・大きさ	付着物	相対位置・挙動	色・材質	形状・大きさ	相対位置・挙動
	Influence	・反射強度低下による最大検知距離低下 ・受信強度のバラつきによる誤認識	・反射強度低下による最大検知距離低下 ・受信強度のバラつきによる誤認識	・車両の低反射部位の未検知	・FOVの端で信号強度が低下 ・車両の挙動により認識不調発生	・材質により反射強度が低下あるいは増加	・ビームに対する反射面積と入射角の影響	・物標表面に付着した汚れなどが反射光量に与える影響	・自車または認識対象の移動による位置ずれ	・背景に類似しコントラスト低下で未認識 ・鏡面等による反射画像で認識不良 ・発光体による点滅で認識不良 ・発光体・反射材とそれ以外の部分で明暗が大きく認識不良	・FOV内に入る画像情報量の制限 ・対象車両の形状による認識率低下	・移動により画像ブレ・流れが発生し認識率低下 ・近距離周辺部では画像流れが大きく認識率低下 ・FOVに入る部分が少なく認識率低下 ・バイクの傾きにより認識に影響
	Principle	低S/N	低S/N	低S/N	低S/N (認識)	Sの減衰 Sの飽和 反射多重反射	Sの減衰 Sの飽和	Sの減衰	空間全体の位置ずれ 認識対象の位置ずれ 認識要因	低D/U、反射、フリッカ、S強度差大 (認識)	S無し(部分的) (認識)	画像ブレ・流れ S無し (部分的) (認識)

表 24 「k-3. 自転車」の外乱要因

		Millimeter waves				LIDAR				Camera		
Influence on sensor principle	Class.	色・材質	付着物	形状・大きさ	相対位置・挙動	色・材質	形状・大きさ	付着物	相対位置・挙動	色・材質	形状・大きさ	相対位置・挙動
	Influence	・反射強度低下による最大検知距離低下 ・受信強度のバラつきによる誤認識	・反射強度低下による最大検知距離低下 ・受信強度のバラつきによる誤認識	・車両の低反射部位の未検知	・FOVの端で信号強度が低下 ・車両の挙動により認識不調発生	・材質により反射強度が低下あるいは増加	・ビームに対する反射面積と入射角の影響	・物標表面に付着した汚れなどが反射光量に与える影響	・自車または認識対象の移動による位置ずれ	・背景に類似しコントラスト低下で未認識 ・発光体による点滅で認識不良 ・発光体・反射材とそれ以外の部分で明暗が大きく認識不良	・FOV内に入る画像情報量の制限 ・対象車両の形状による認識率低下	・移動により画像ブレ・流れが発生し認識率低下 ・近距離周辺部では画像流れが大きく認識率低下 ・FOVに入る部分が少なく認識率低下 ・自転車の向きで認識率に影響 ・進行方向で認識率に影響
	Principle	低S/N	低S/N	低S/N	低S/N (認識)	Sの減衰 Sの飽和 反射多重反射	Sの減衰 Sの飽和	Sの減衰	空間全体の位置ずれ 認識対象の位置ずれ 認識要因	低D/U フリッカ、S強度差大、(認識)	S無し(部分的) (認識)	画像ブレ・流れ S無し(部分的) (認識)

表 25 「k-4. 歩行者」の外乱要因

		Millimeter waves			LIDAR			Camera		
Influence on sensor principle	Class.	色・材質 (身に着けたもの)	姿勢・形状・大きさ	相対位置・挙動	色・材質	形状・大きさ	相対位置・挙動	色・材質	形状・大きさ	相対位置・挙動
	Influence	・受信強度低下による最大検知距離低下 ・受信強度のバラつきによる誤認識	・体格、体勢により、反射強度低下	・FOVの端で信号強度が低下 ・人の挙動により認識不調発生	・材質により反射強度が低下あるいは増加	・ビームに対する反射面積と入射角の影響	・自車または認識対象の移動による位置ずれ	・背景に類似しコントラスト低下で未認識 ・発光体による点滅で認識不良 ・発光体・反射材とそれ以外の部分で明暗が大きく認識不良	・FOV内に入る画像情報量の制限 ・対象の背の高さによる認識率低下	・移動により画像ブレ・流れが発生し認識率低下 ・近距離周辺部では画像流れが大きく認識率低下 ・FOVに入る部分が少なく認識率低下 ・歩行者の進行方向や歩行速度で認識に影響
	Principle	低S/N	低S/N	低S/N (認識)	Sの減衰 Sの飽和 多重反射	Sの減衰 Sの飽和	空間全体の位置ずれ 認識対象の位置ずれ 認識要因	低D/U フリッカ、S強度差大、(認識)	S無し(部分的) (認識)	画像ブレ・流れ S無し(部分的) (認識)

3.4.2.3. センサ認識外乱の発生原理

センサは対象物を認識する際、前項で記述した要因によって認識外乱に達する可能性がある。認識外乱が生じる原理はセンサごとに異なるが、以下を共通の考え方として原理を分類することができる。

- ・センサの外乱原理を、「知覚処理で生じるもの」、「認識処理で生じるもの」、「その他」に分類する。
- ・知覚処理で生じる外乱はさらに、認識対象物からの信号 S に関するものと、認識対象物からの信号を妨害するもの（ノイズ N, 不要信号 U）とに分類する。
- ・信号 S と、ノイズ N または不要信号 U それぞれについて、信号に起こり得る外乱を列挙する。

これらの考え方にに基づき、各センサに起こり得る認識外乱の発生原理を分類した例を、以下に示す。

・ ミリ波レーダの認識外乱発生原理

ミリ波レーダにおける外乱は、知覚処理で生じるもの、認識処理で生じるものの他に、センサの向きに起因するものがある（図 39）。

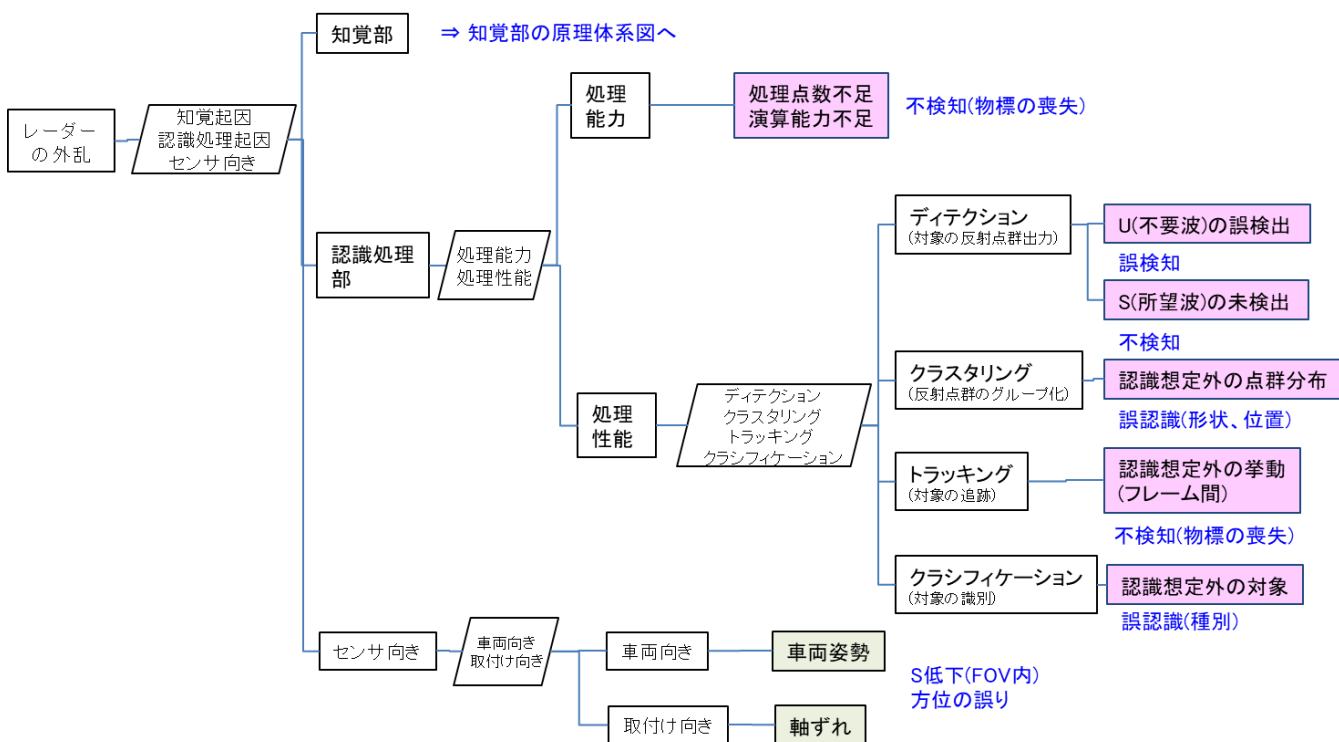


図 39. ミリ波レーダにおける認識外乱の分類

特に、ミリ波レーダの知覚処理において信号 S を特徴づける物理量は、周波数、位相および強度の3つである(図 40)。

- 周波数: センサ本体に起因する外乱として信号周波数の異常が挙げられる。
- 位相: 信号到来方向が変化する場合と伝搬遅延時間が増加する場合とがあり、到来方向変化は反射および屈折に起因する。
- 強度: 部分的な信号欠如、信号が強すぎる、信号強度差が大きい、信号が弱すぎるというバリエーションが考えられる。

一方、知覚処理におけるノイズ N と不要信号 U については、低 S/N、低 D/U(必要な信号 D と不要信号 U との強度比)、U 増大といった外乱が考えられる。

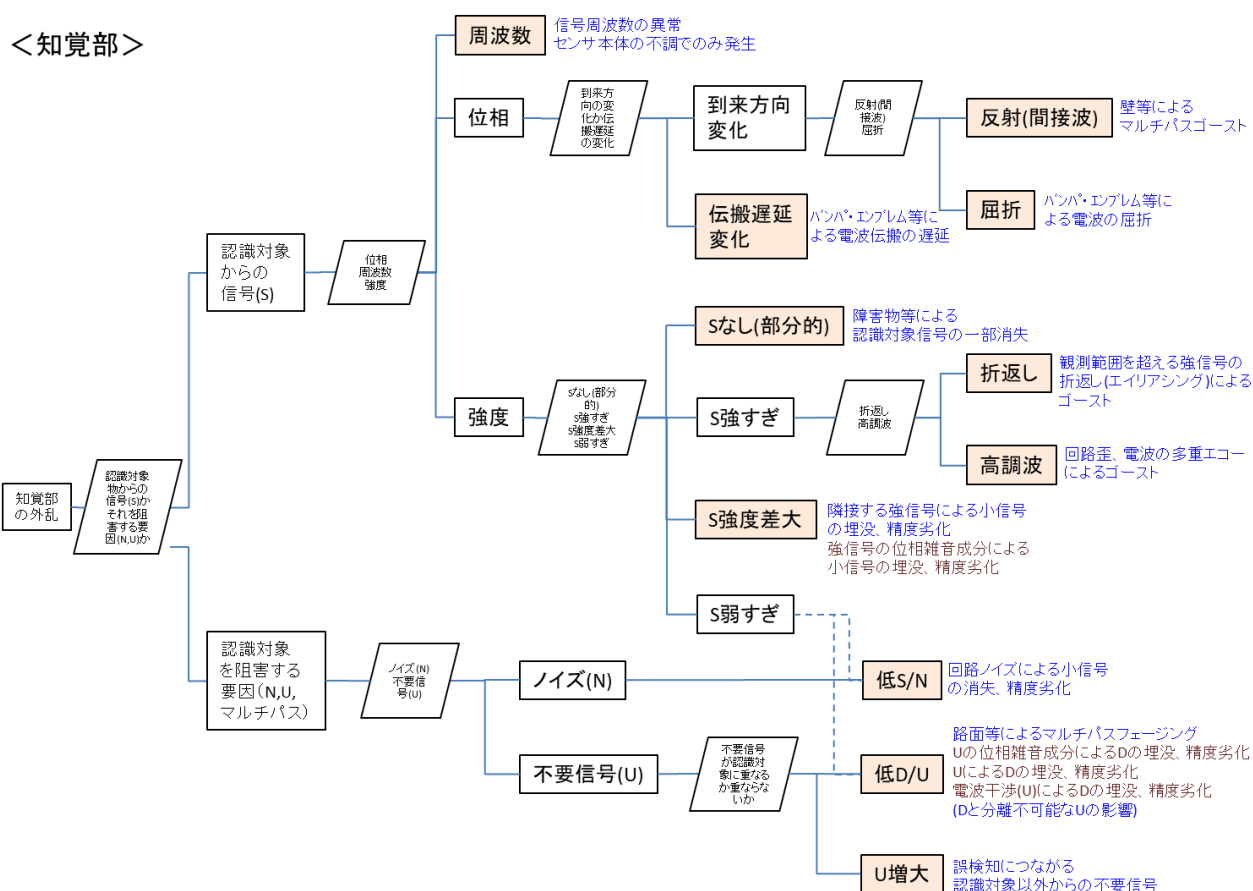


図 40. ミリ波レーダの知覚処理における外乱発生原理

- LiDAR の認識外乱発生原理

LiDAR における外乱は、Radar 同様、知覚処理で生じるもの、認識処理で生じるものの他に、センサの向きに起因するものがある(図 41)。

認識要因の外乱の体系図

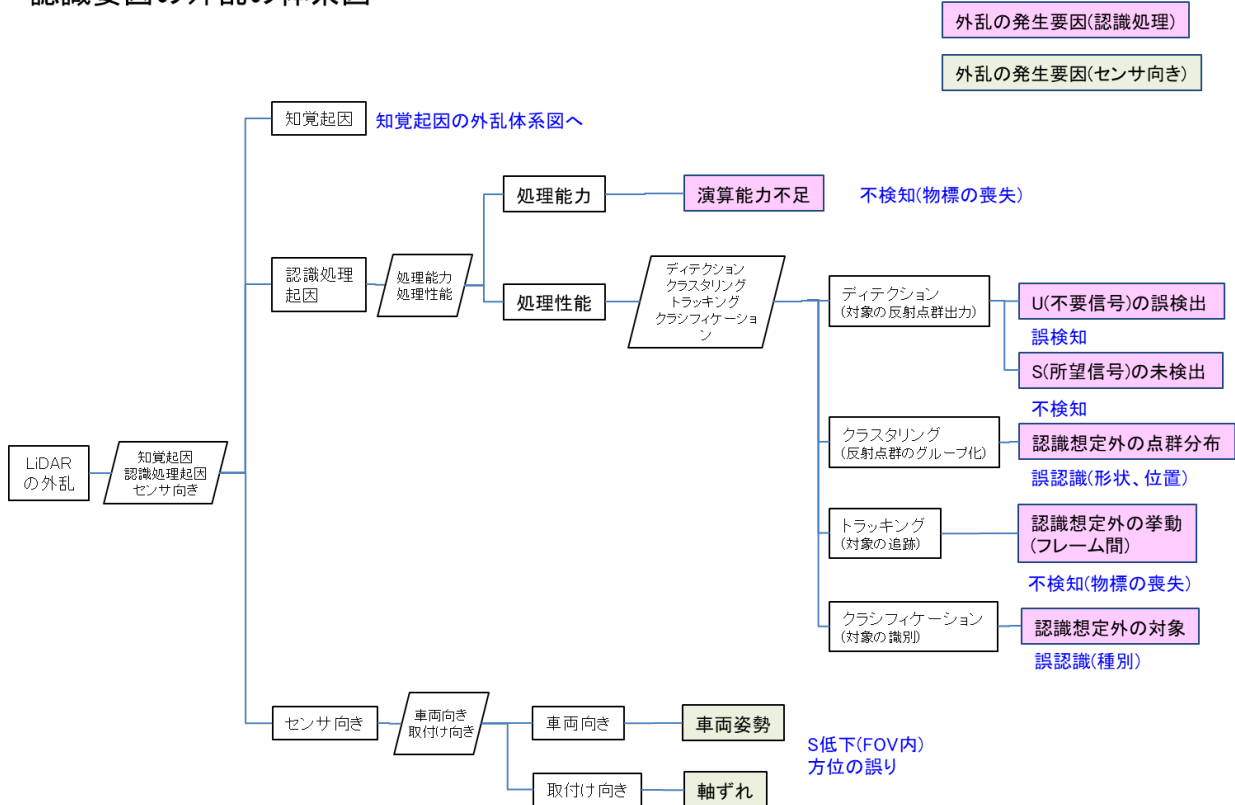


図 41. LiDAR における認識外乱の分類

LiDAR の知覚処理においては、認識対象物からの信号 S を特徴づける物理量は、スキャンタイミング、強度、伝播方向および速度がある。

- スキャンタイミング：自車両が移動することによる時間差は空間全体の位置ずれにつながり、認識対象物が移動することによる時間差は認識対象物の位置ずれにつながる。
- 強度：信号の飽和、減衰および遮蔽が現象として挙げられる。
- 伝播方向の変化：反射によるものと屈折によるものがある。
- 速度：信号の到達時間に影響するが、LiDAR の認識外乱では該当項目なし。

一方、ノイズ N と不要信号 U については、DC 的なノイズ、パルス状のノイズ、多重反射のほか、認識対象以外の物体からの反射と屈折とが挙げられる(図 42)。

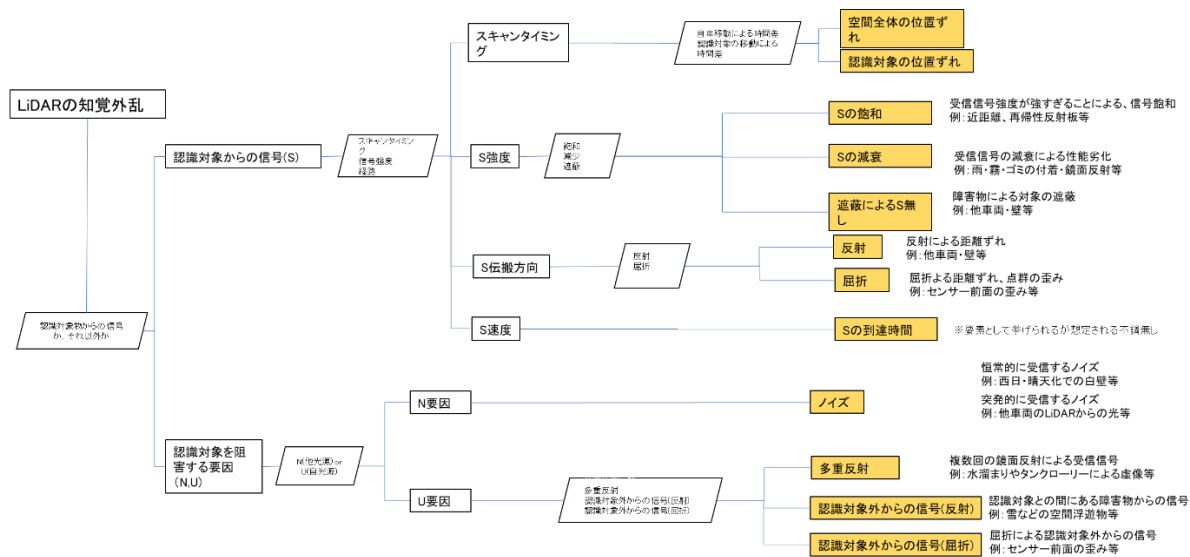
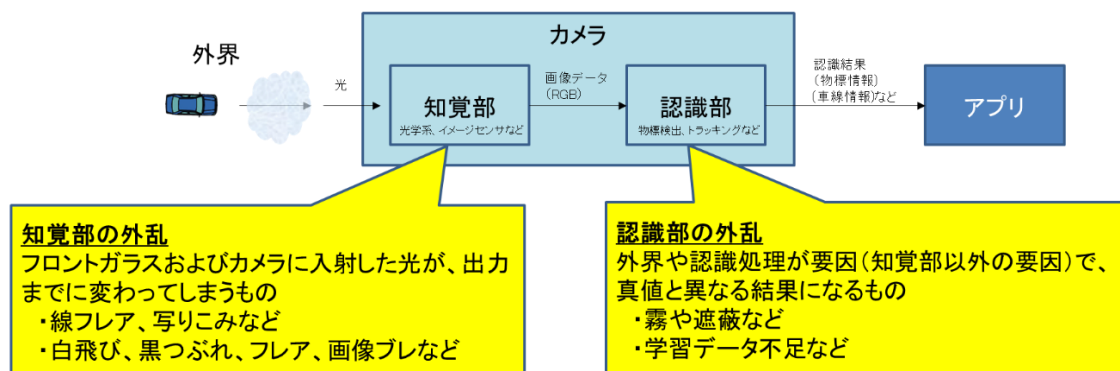


図 42. LiDAR の知覚処理における外乱発生原理

カメラの認識外乱発生原理

カメラの知覚処理においては、信号の処理プロセスに着目し、光学部品で起きる光の性質として“光学系”、ノイズの定義として“イメージセンサ”、画像の色要素として“画像処理”で分類する。イメージセンサのシグナルについても処理プロセスに着目し、露光の時間制御、電荷蓄積、A/D 変換に分類する(図 43)。

知覚部の外乱、認識部の外乱 の定義



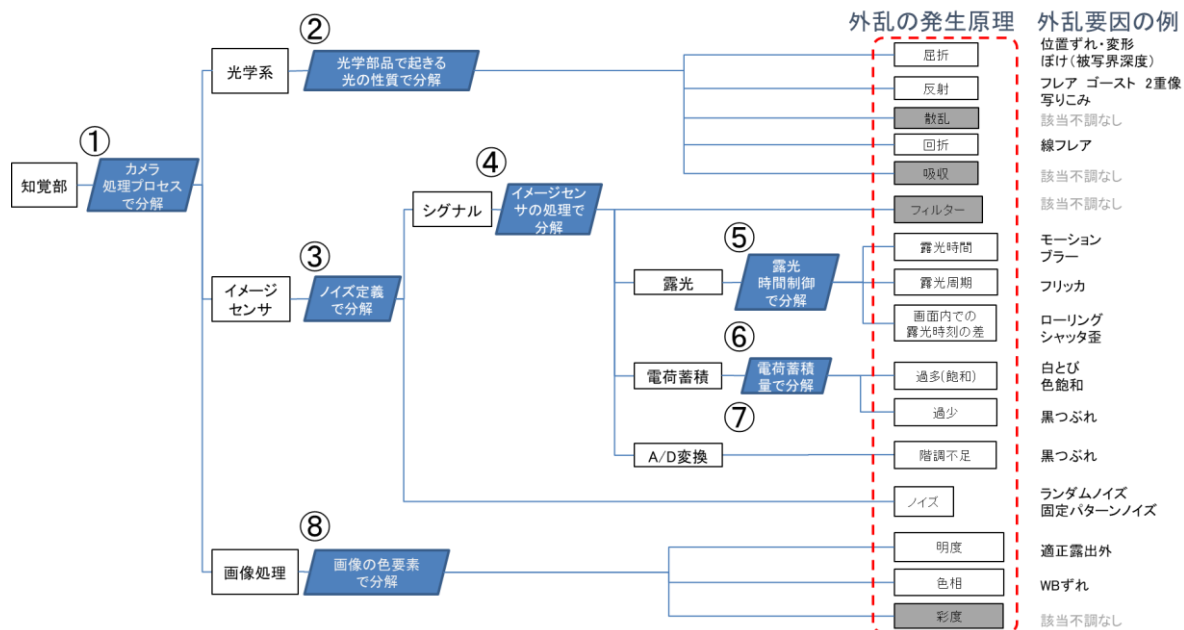


図 43. カメラの知覚における外乱発生原理

カメラの認識処理においても処理プロセスに着目すると、“特徴抽出”、“識別”、“位置推定”、“トラッキング”に分類する事ができる(図 44)。

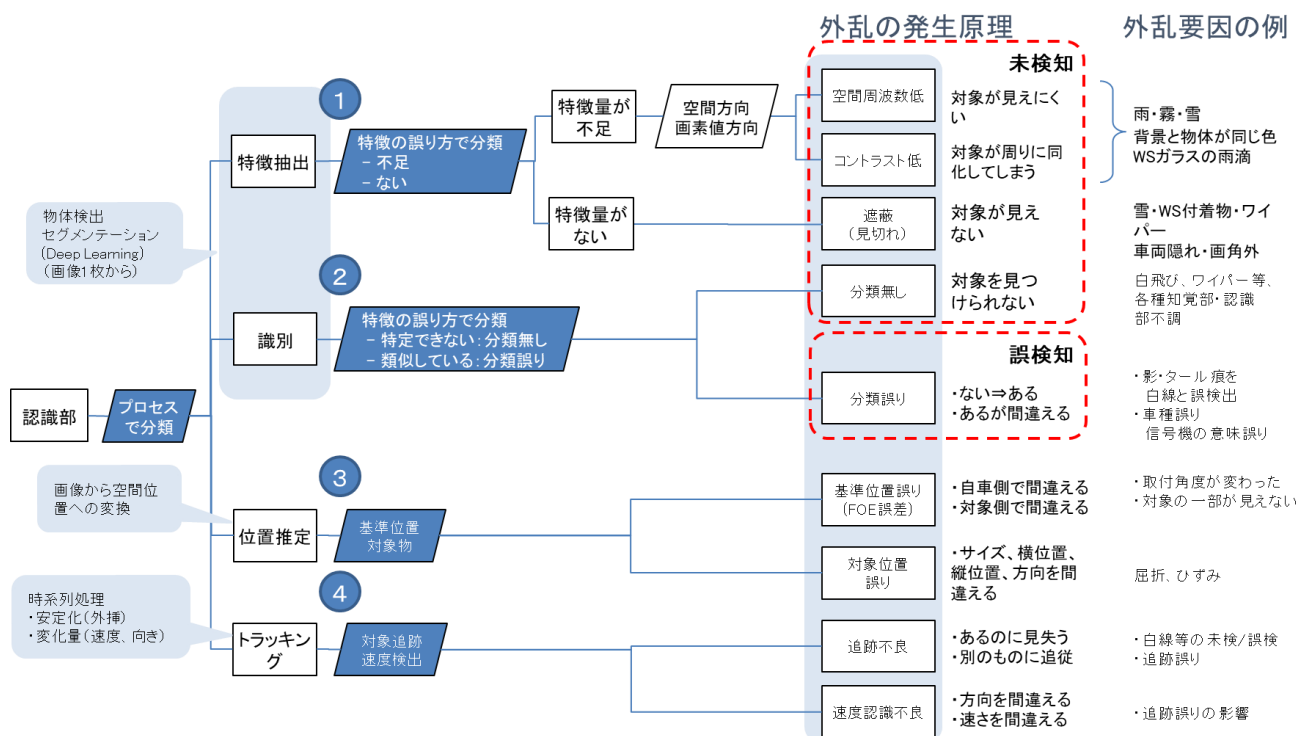


図 44. カメラの認識における外乱発生原理

3.4.2.4. 認識外乱要因と発生原理のクロスチェックによるシナリオ選出

ここまでに述べた各センサの認識外乱の要因と発生原理との関係は、表 26～表 30 のようなマトリックスで表すことができる。このマトリックスでは、縦方向に認識外乱要因を、横方向に発生原理を並べており、各原理(=列)についてそれを生じ得る要因(=行)として該当するものが分かる形としている。同じ列内で該当する複数の外乱要因はどれも同じ原理によって生じるため、いずれかの外乱要因が他の外乱要因を代用すると考えることができる。但し、要因によってパラメータの範囲が異なるため、安全性の評価を行う際は、評価対象のシステムの ODD に対して同等以上の範囲をカバーする外乱要因を選定する必要がある。

候補となる要因が複数ある場合には、そのシナリオの評価環境の再現しやすさも考慮した上で1つまたは複数の要因を選択し、評価対象とする。また、対象とする自動運転システムの仕様(ODD、認識対象物など)によって、縦軸に表した項目の中にそのセンサでは該当しない外乱要因がある場合には、それらを除外して残された要因の中から代表シナリオを選出する。

表 26 ミリ波レーダの認識外乱要因と発生原理のマトリックス

[illegible]

表 27 LiDAR の認識外乱要因と発生原理のマトリックス

			知覚不調												認識不調					
			認識対象からの情報						認識対象を誤認する要因						処理能力		処理性能			
			スキミング	S強度	Sの範囲	Sの減衰	Sの減衰によるS値	Sの範囲	S強度	Sの範囲	Sの減衰	Sの減衰によるS値	Sの範囲	Sの減衰	処理能力不足	処理性能不足	ディテクション(知覚不調)	クラスタリング	トラッキング	クラシフィケーション
			空間全体の知覚され	認識対象の知覚され																
車上センサー	自動車	車両姿勢変化	車両状態起因(半恒久的)																	
			車両状態起因(一時的)																	
		搭載バランキ	飽すれ(飽和範囲内)																	
	センサ	センサ表面物変化																		
		センサ本体の不調	センサ本体(電子部品)劣化																	
			外装ノイズによる電磁気的影響																	
	センサ全面	付着物	水																	
			泥																	
			雪・埃																	
		特性変化	洗車WAX																	
周辺環境	路面	形状	上り勾配																	
			下り勾配																	
			凹凸																	
		路面状態	水たまり																	
			アイスバーン																	
			道路修復跡																	
	材質	舗装																		
			アスファルト																	
			コンクリート																	
			砂利																	
	路側構造物	反射																		
		遮蔽																		
	上方構造物	反射																		
		遮蔽																		
	空間	空間障害物	雪																	
			雨																	
			霧																	
			その他(空間浮遊(飛来物))																	
			虫・空間浮遊																	
			塵・空気中の塵																	
空間中の電波・光		直射光×インフラ																		
		直射光×自然																		
周辺移動物	反射																			
	色・材質																			
	形状																			
	傾斜位置																			
	色・材質																			
	形状																			
	傾斜位置																			
	色・材質																			
	形状																			
	傾斜位置																			
ロード・エッジ	段差の無いロード・エッジ	色・材質																		
		形状																		
		傾斜位置																		
	段差の有るロード・エッジ	色・材質																		
落下物	色・材質																			
	形状・大きさ																			
	傾斜位置・挙動																			
	動物	色・材質																		
設置物	形状・大きさ																			
	傾斜位置・挙動																			
	色・材質																			
	形状・大きさ																			
移動物	他車両	色・材質																		
		形状・大きさ																		
		傾斜位置																		
		色・材質																		
	バイク	形状・大きさ																		
		傾斜位置																		
	自転車	色・材質																		
		形状・大きさ																		
	歩行者	傾斜位置																		
		色・材質																		

表 28 カメラの認識外乱要因と発生原理のマトリックス (要因: 車両／センサ、周辺環境)

[illegible]

表 29 カメラの認識外乱発生原理と要因（要因：認識対象一走路・交通情報・路上障害物）

[illegible]

表 30 カメラの認識外乱発生原理と要因（要因：認識対象—移動物）

[illegible]

例として、上記の考え方によって選出したシナリオの1つを図 45 に示す。シナリオの説明図には、以下の要素が含まれる必要がある。詳細は Annex E 認識外乱の原理モデルと評価シナリオを参照のこと。

- ・シナリオの概要説明
- ・当該シナリオにおける認識対象物、周辺環境、自車・センサの状況図示
- ・パラメータ項目、範囲の一覧

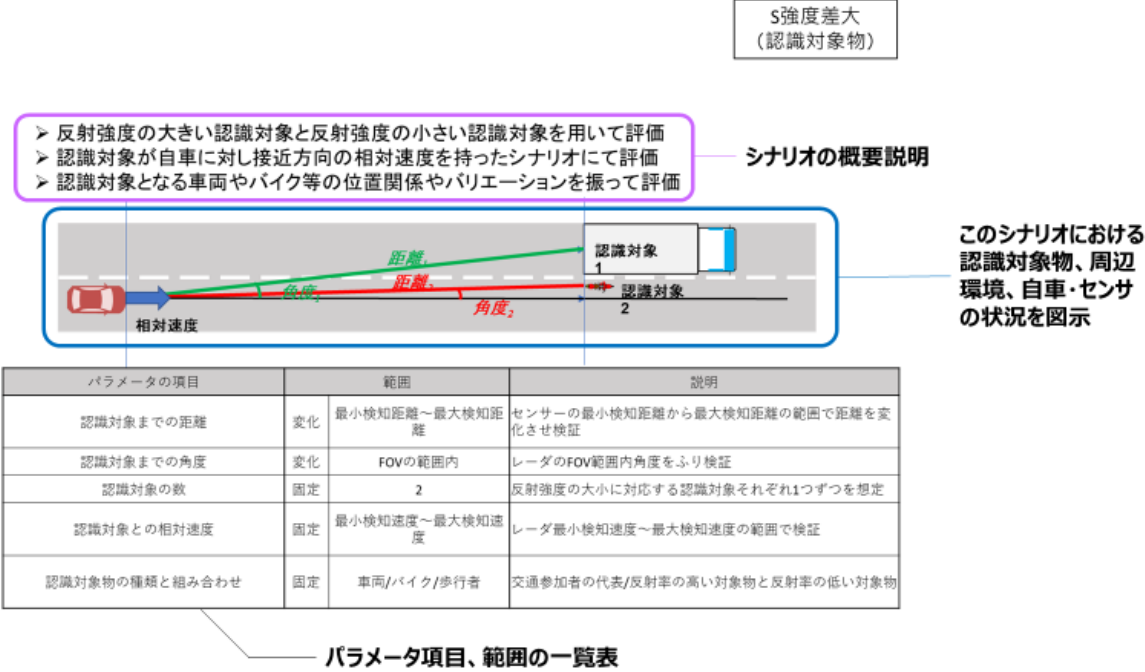


図 45.識外乱評価シナリオ説明図の例

3.4.2.5. 認識外乱の組み合わせ評価

認識外乱は、1つのセンサに対して複数の要因が同時に発生することがあり得るが、このとき複数の要因間で認識性能への影響が互いに強め合う場合には、要因どうしを組み合わせた認識性能評価が必要となる。影響が強め合うか否かは認識外乱の発生原理に基づき考える必要があり、前項のマトリックスにおいて異なる列同士で原理的に影響を判断する。判断の結果、互いに影響が弱め合うもしくは影響しない原理同士では、組み合わせ評価の対象外とする(図 46)。

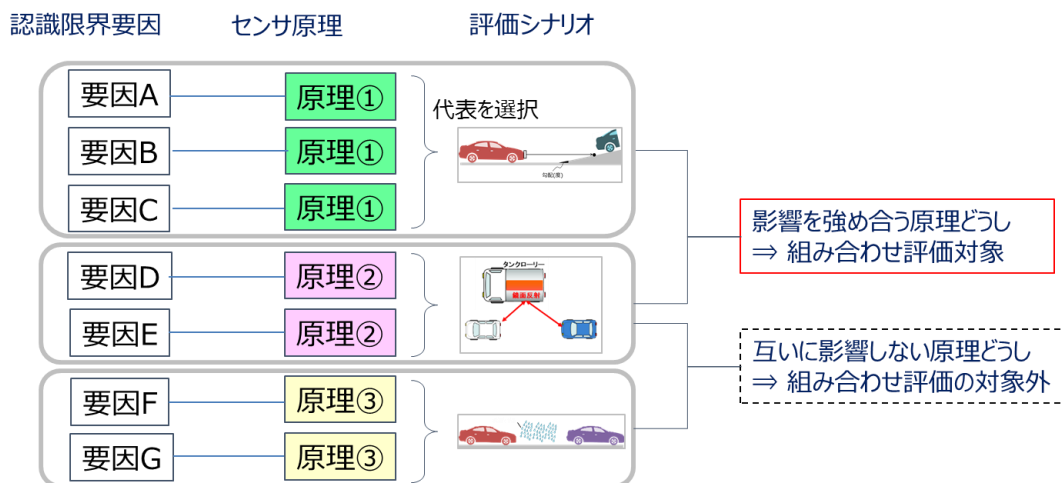


図 46. 組み合わせ評価対象となる認識外乱発生原理

3.4.2.6. 複数センサを搭載した自動運転システムの認識外乱評価

自動運転システムは一般に、複数のセンサを組み合わせたセンサフュージョン系を構築している。システムとしての認識性能を評価する場合には、そのセンサ構成に基づき上記の過程で選出した各センサ単体の評価シナリオを集めた合体版のシナリオリストを作成し、システム全体として各外乱条件下での評価を行うものとする。

3.4.2.7. 死角(Obstructed view)シナリオ

前述の(3.4.1.1)の交通外乱シナリオ構造は、周囲車両が常に検出可能であることを前提としている。しかし、実際の交通環境では、周囲車両や道路構造などが他車両(以下、周辺車両)を一時的に覆い隠す場合があり、これにより死角が発生する。したがって、死角に起因する安全関連シナリオを体系的に整理し、安全分析に組み込む必要がある。

NOTE: 本章で扱う「死角」とは、一般にミラーやピラーによるドライバの直接視認できない領域(いわゆるブラインドスポット)を指すものではなく、他車両や構造物によって物理的に視界が遮られる状態を指す。英語表記では“Obstructed view”を用いるが、日本語では「視界遮蔽」がより正確な表現であるものの、本書では便宜上「死角」と記載する。

死角シナリオは、周辺車両による死角、道路構造による死角、道路勾配による死角の3つのサブカテゴリに分類される(図 47)。

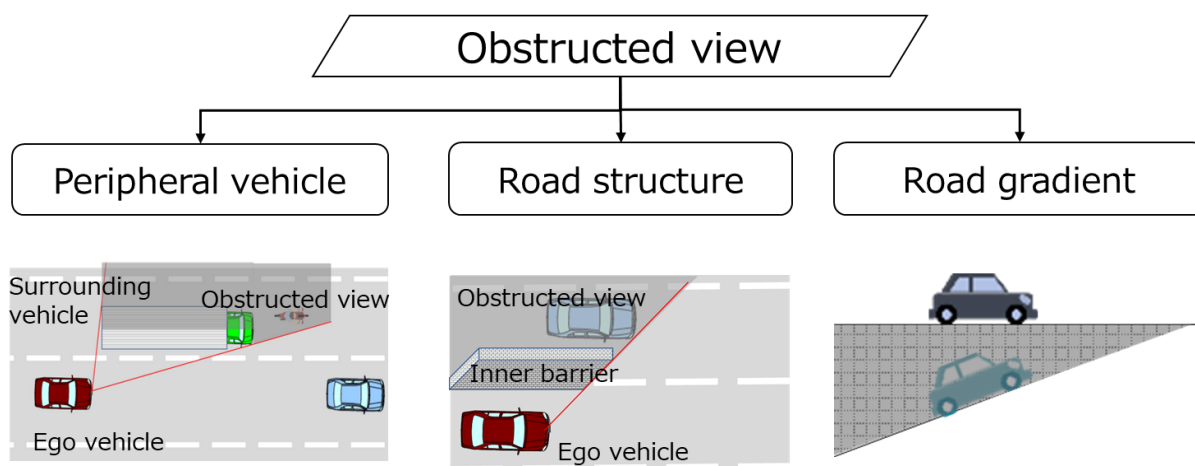


図 47. 死角関連の認識不調分類

3.4.2.8. 周辺車両による死角シナリオ

周辺車両による死角シナリオを構造化するために、自車両を中心に 8 つの周辺車両位置を配置し、それらの周辺に 16 の新しい位置定義を追加した(図 48)。各周辺車両は、周辺車両の直後の車両だけでなく、他の周辺車両にも影響を及ぼす死角を誘発する可能性があることに留意されたい。これは、自車と周辺の車両がカーブ路を走行する場合など、死角領域と、その領域内にある車両位置とが変化する場合に特に当てはまる。更に、一般道では対向車による視界が生じるため、自車と周辺車両が同方向の場合と対向の場合がある。

この動的現象を明らかにするために、追加の図と説明を以降に示す。自車と同じレーン内の道路の曲率と周辺車両の組み合わせとして導出される周辺車両の死角を説明するプロセスを図 49 に示す。同様に、自車に対して横方向または斜めの位置にある周辺車両に関連する死角を、それぞれ図 50 と図 51 に示す。

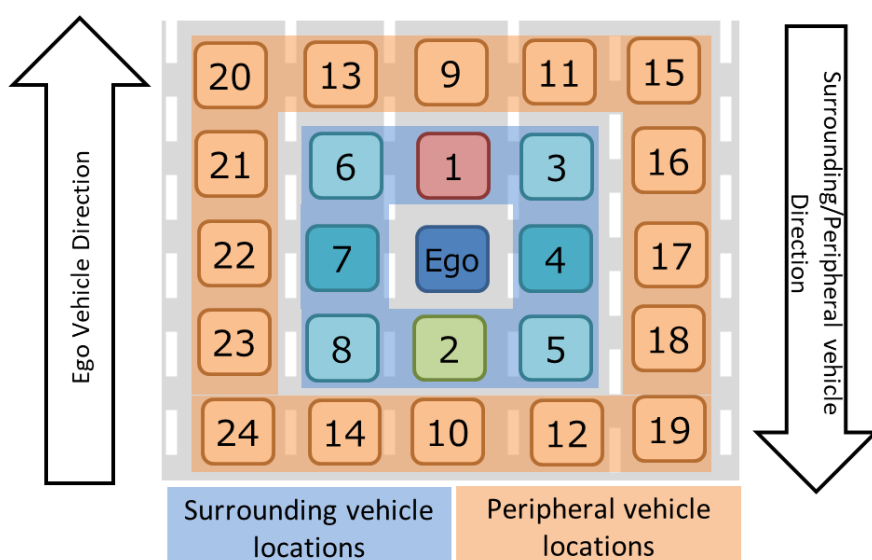


図 48. 周辺車両関連の死角シナリオを定義するために適用される車両位置

図 49 では、周辺車両が位置 1 によって発生する死角の位置を示す。図中では、解りやすさのために、周辺車両として大型車両を使用している。直線道路における大型車両によって発生する死角位置は、位置 9 のみである。しかし、自車と大型車両の両方が右カーブを通過すると、自車に対する大型車両の方向が変化

し、車両位置 6、9、13、20、21 に死角が発生する。同様に、左カーブでは、位置 3、9、11、15、16 の車両は、大型車両によって隠されることがある。これにより、合計 9 つの死角位置(3、6、9、11、13、15、16、20、21)が追加され、危険な操作が発生する可能性がある。9 つの死角位置の中で包含関係にある位置が存在する。例えば、右カーブにおいて、死角位置 20 の車線変更は死角位置 13 への移動である。死角位置 13 は、死角位置 20 よりも自車と近距離であり、反応に必要な時間がより短い厳しい条件である。したがって、死角位置 13 に対して安全性評価をすることで、死角位置 20 の危険動作を包含することができる。同様の理論に従って、死角位置 15、16、および 21 も、死角位置の最終リストから除外することができる。したがって、安全解析で最終的に考慮される位置 1 の車両によって誘発される死角位置は、5 つの位置(3、6、9、11、および 13)に低減される。これらの 5 つの位置は、図 49 の右側の単純化された長方形の図にまとめられる。

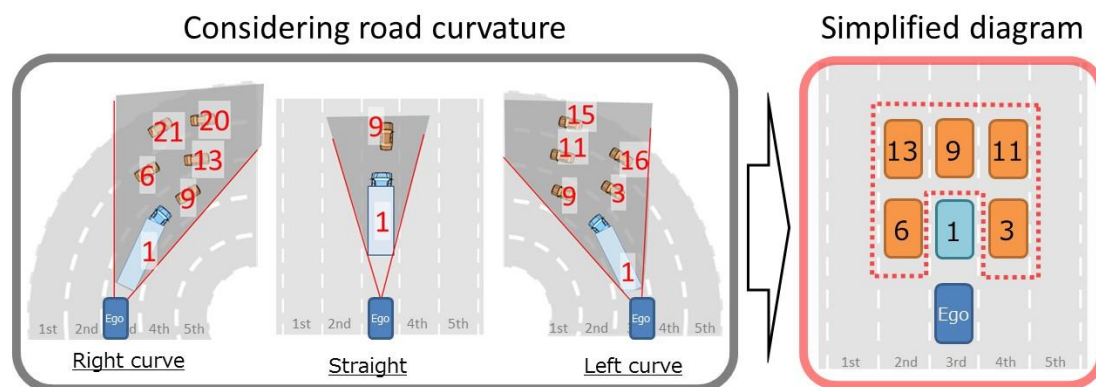


図 49. 前方方向位置 1 における周囲の車両による死角位置

図 50 は、周辺車両の位置 4 にある大型車両によって発生する全ての死角位置を示す。直線道路上では、大型車両は、5 つの死角位置(3、5、16、17、および 18)を抽出することができる。自車と大型車両の両方が右カーブを通過すると、死角の数が周辺車両の位置(1、2、3、5、6、8、16、17、18、21、23)が 11 箇所に増加する。左側のカーブでは、これらの位置(16、17、18)の 3 箇所に車両が隠れる可能性がある。この場合、安全分析において考慮される死角位置の数の減少も実施される。例えば、位置 6 の車両による車線変更が、その右側の隣接車線に行われると、位置 1 と同様の位置に移動する。したがって、安全解析が行われる場合、最も厳しいシナリオの原則に基づいて、位置 1 の車両について、位置 6 からの車両による操縦もカバーされる。同様の理論は、車線を 21、8、または 23 の位置から、それらの右側の隣接車線に変更する車両にも適用される。位置 6 における車両の減速は、自車両および位置 1 における車両による隣接する左車線への同時車線変更よりも要求が少ない。したがって、位置 6 の車両を位置 1 の車両に置き換えることができる。同様に、ロケーション 8 における車両による加速動作は、同時の自車および車両 2 の車線変更よりも重要ではない。さらに、車両 16、17、および 18 のカットインシナリオは、車両 4 が自車の隣にあり、自車が車線変更を実行できないため、解析から除外される。したがって、最終的な安全解析で考慮される位置 4 の車両によって誘発される死角は、4 つの位置(1、2、3、および 5)に低減され、これらは、図 50 の右の長方形の簡略図に要約される。

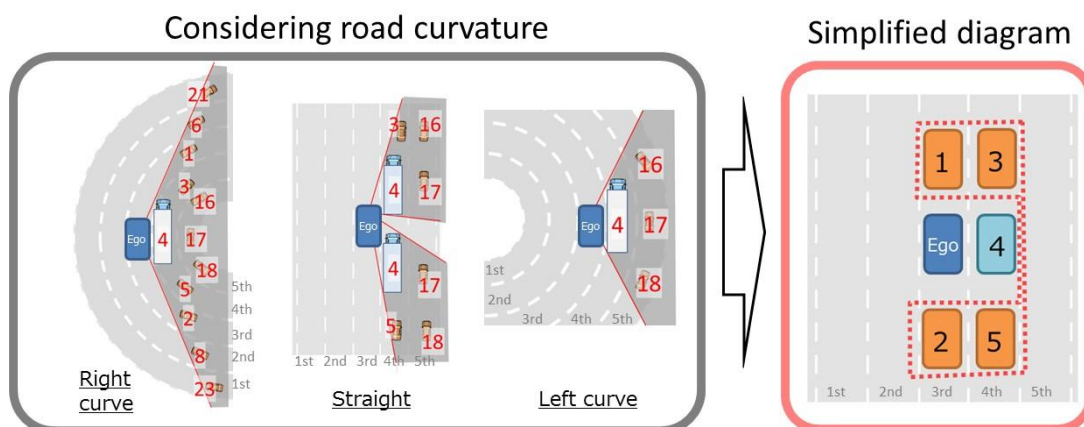


図 50. 横方向位置 4 での周囲車両による死角位置

図 51 は、周辺車両の位置 3 にある大型車両によって発生する、自車両に対して対角線上にあるすべての死角位置を示す。直線道路では、大型車両が 3 つの死角位置(11、15、16)を発生させることがある。自車と大型車両の両方が右カーブを通過すると、死角が周辺車両の 9 つの車両位置(1、6、9、11、13、15、16、20、21)に増加する。左側のカーブでは、15 と 16 の 2 箇所が死角となる。図 50 に示された前の場合と同様に、位置 6、13、20、および 21 の車両によるカットインシナリオは、位置 9 および位置 11 の車両より厳しいシナリオに置き換えられる。さらに、車両 6 および 13 の減速シナリオは、自車両および車両 9 が同時に左へ車線変更する動作で置き換えられる。最後に、安全解析で考慮される斜め位置 3 の車両によって誘発される死角位置は、5 つの位置(1、9、11、15、および 16)に低減される。これらは、図 52 の右側の簡略化された長方形図に要約されている。

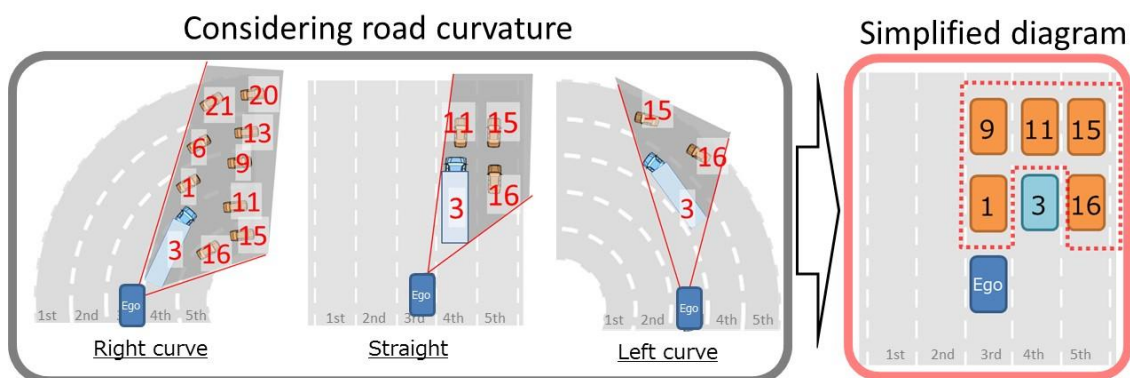


図 51. 位置 3 の周辺車両による死角の位置

図 49 から図 51 に示された 3 つのケースにアナロジーと対称性の原理を適用することにより、安全解析で考慮される死角の位置はすべて、単一のダイアグラムにまとめられる(図 52)。
ここまで、自車と同一方向の場合で説明してきたが、一般道を考慮した場合は対向車が含まれている点で異なる。

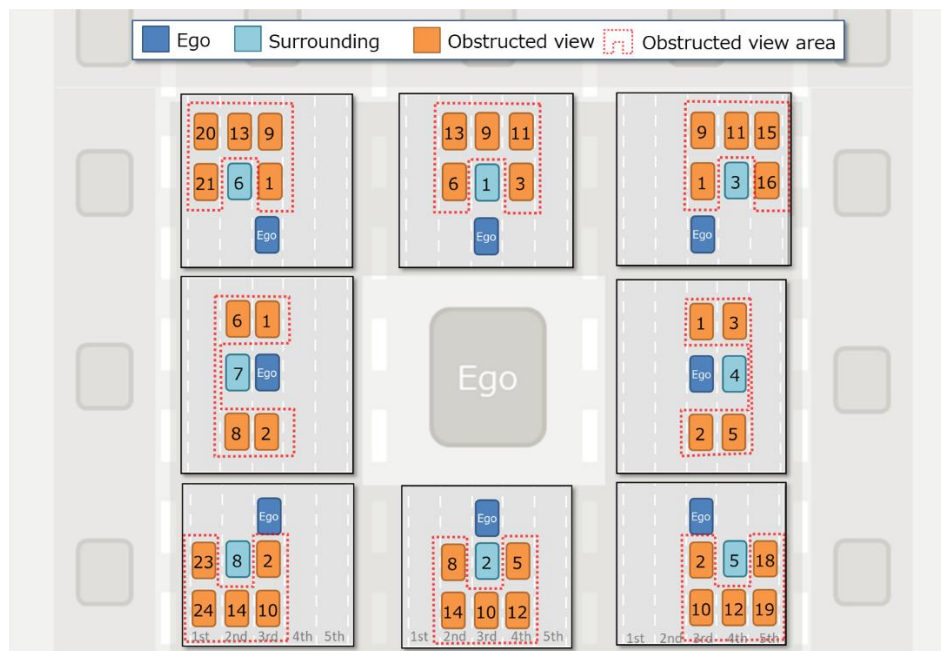


図 52. 安全解析で考慮される周辺車両誘発死角位置のすべての図

発生しうる死角車両運動は、直進（加速、減速）、レーンチェンジ（Cut-in, Cut-out）/Swerving に分類される。安全解析において考慮される組合せの数の減少は、自車の挙動を妨げる可能性のある死角車両の動きに焦点を当てることによって行われる（図 53）。例えば、自車両の後方の死角位置（2、5、8、10、12、14、18、19、23、24）における車両の全ての減速操作は、自車両に危険を及ぼさないため除外する（これらの位置は対向車についても同様に除外される）。また、自車両と死角車両との間の同期は、自車両に危険を及ぼさないことにも留意されたい。図中の丸印は、死角車両の位置と自車の障害となる可能性のある運動との対応する組み合わせを示している。したがって、安全解析ではこれらを考慮する必要がある。

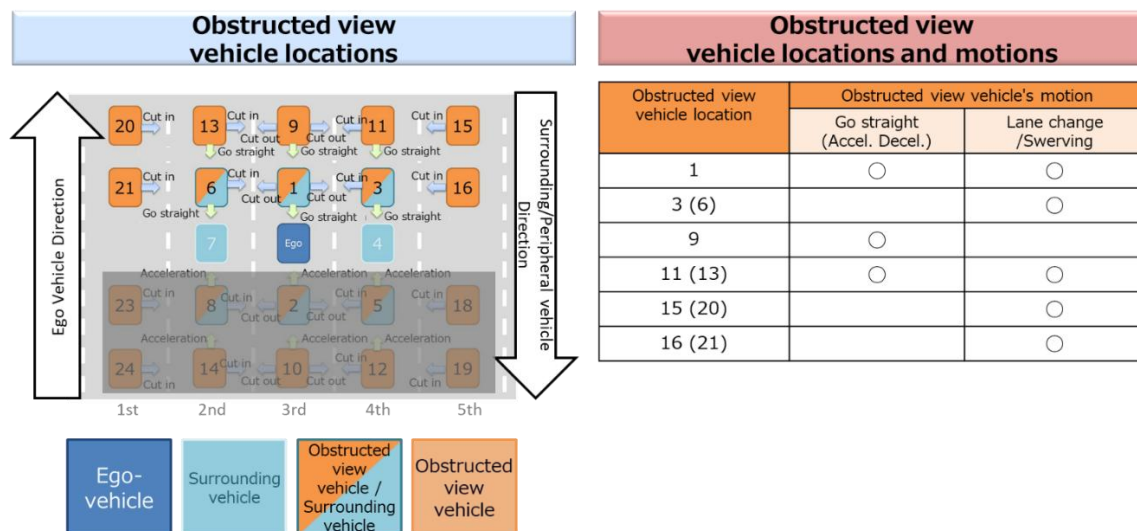


図 53. 死角車両の位置(左)、および死角車両の位置と自車両の障害となる可能性のある動作の組み合わせ(右)

さらに、交差点では自車が直進または右左折する場合に加え、周辺車両の進行方向（同方向／対向）に応じて死角発生箇所が異なる。これらを整理した配置を図 54 に示す。一般道を含む場合は、対向方向の交通も含めたシナリオ構成が必要である。

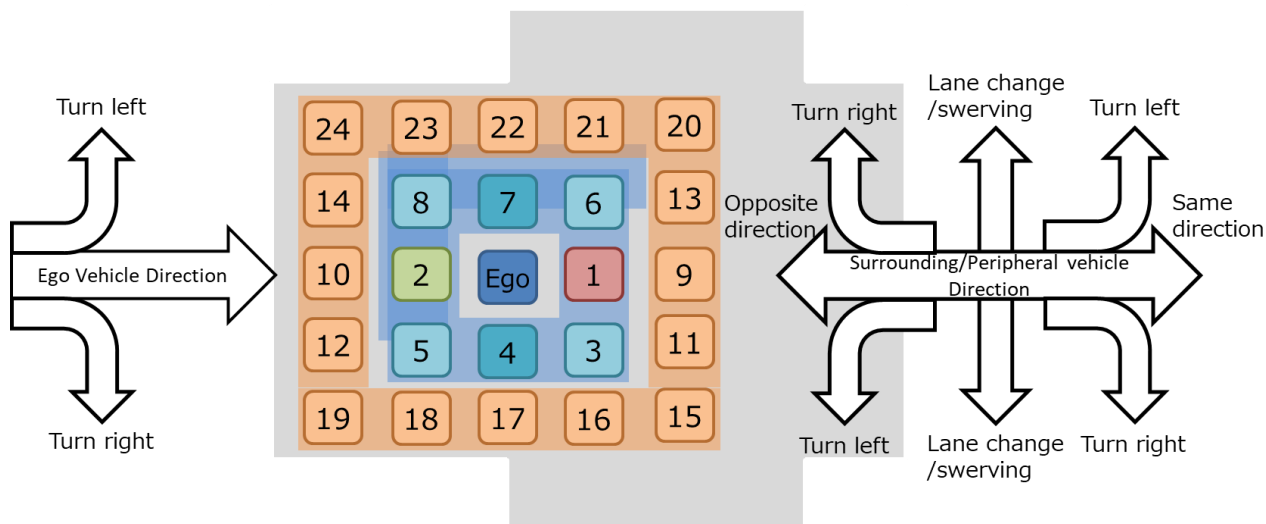


図 54. 交差点時の自車両と周辺車両の位置

交差点においても同様に起こり得る車両挙動を考えると、周辺車両の配置は図 52 と同等である。これらの配置に対し周辺車両の挙動を付与し、その車両挙動によって死角が生じるうるかを整理した結果を図 55 に示す。なお、左右対称であるため片方のみ示している。

22	21	20
7	6	13
E	1	9
4	3	11
17	16	15

Obstructed vehicle position	Surrounding vehicle behavior								
	Peripheral Lane keep			Peripheral Lane change/Swerving			Peripheral Turning		
	Obstructed vehicle behavior								
	Same	Crossed From L/R	On coming	Same	Crossed	On coming	Same	Crossed	On coming
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3 (6)	0	0		0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11 (13)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15 (20)		0		0	0	0		0	
16 (21)		0		0	0	0		0	
17 (22)		0			0			0	

図 55. 交差点における周辺車両の配置と車両挙動

3.4.2.9. 道路構造による死角シナリオ

道路構造に起因する死角シナリオは、道路構造物の位置関係と、自車および死角車両の相対動作を組み合わせて定義される。一般に、これらの遮断要素は、道路構造内にあり、道路構造物の種類と位置に応じて、内部障壁と外部障壁に分類される(図 56)。

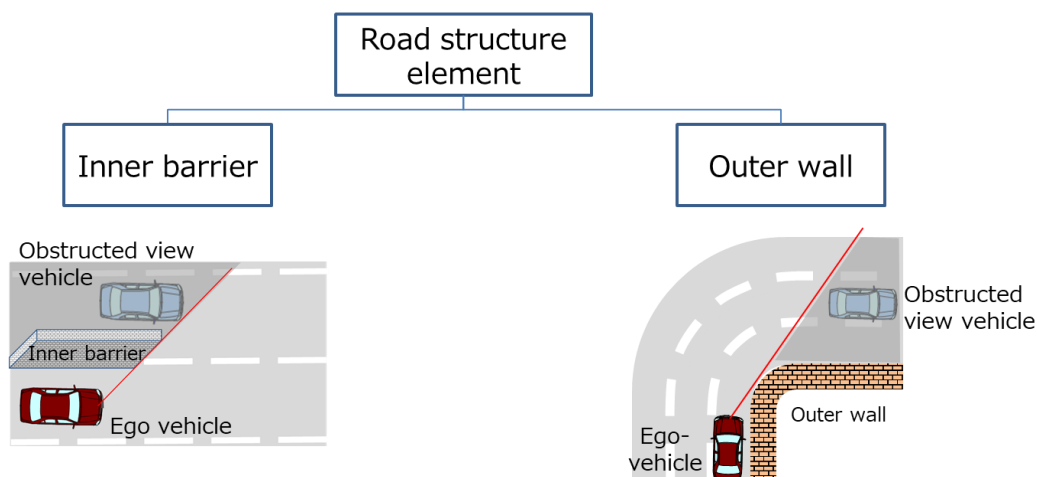


図 56. 道路構造による死角シナリオ分類

3.4.2.9.1. 内部障壁 (Inner barrier) による死角シナリオ

図 57 では、自車が構造物の手前にいる場合、構造物の後ろにいる車両(車両①)は認識できず、死角車両と言える。自車が構造物の中間にある場合も同様で、死角車両は、後方(車両③)、前方(車両④)である。構造物の横中央の車両は、安全に影響を与えないと考えられる。これは、死角に隣接する車両が、構造物により、自車の車線に近づくことができないからである。しかし、死角車両は斜め後方に位置している場合(車両②)、構造物の途切れた直後に車両が現れると安全上の懸念がある。

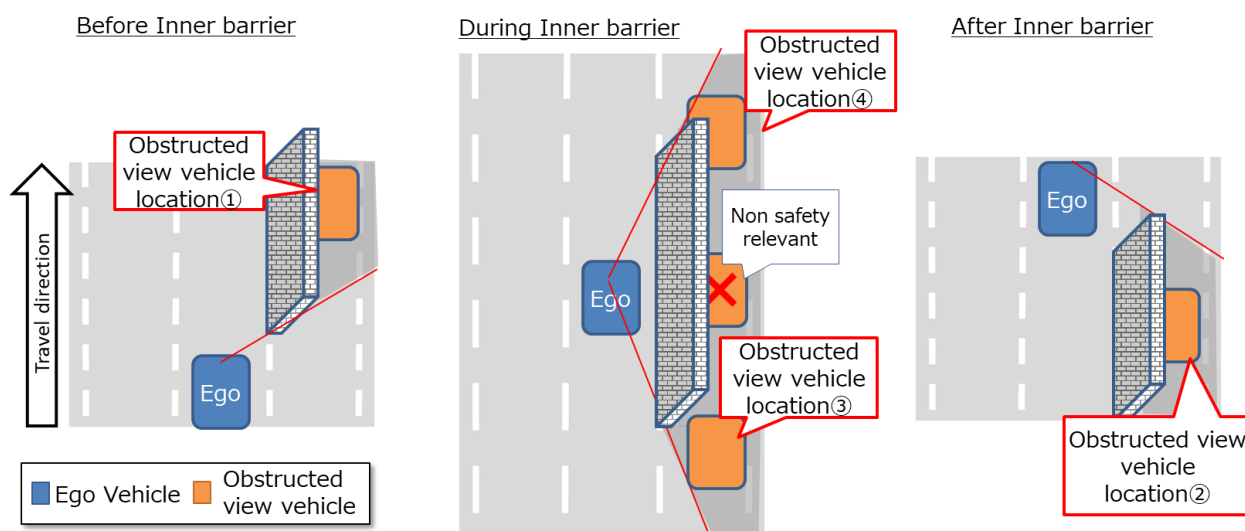


図 57. 内部障壁に関連する死角の定義

図 58 に示したマトリックスは、内部障壁に関連した死角による認識限界シナリオをまとめたものである。マトリックスでは、前述した 4 つの死角(青い四角で表された自車と、暗い灰色の領域に配置された死角車両)が、これらの死角領域内の車が可能な操作(直進、レーンチェンジ: 対向時も同様)と組み合わせられる。これにより、16の可能な組み合わせを持つマトリックスが得られるが、すべての組み合わせが安全に関連するわけではない。これにより、合計9つの内部障壁による死角シナリオ(図 58)に丸で示される)が安全分析に組み込まれる。





Inner barrier related Obstructed view pattern		Obstructed view vehicle's movement			
		Same direction		On coming	
		Obstructed view vehicle's behavior			
		Go straight	Lane changing /swerving/turning	Go straight	Lane changing /swerving/turning
1		<div>○</div> <div>Deceleration</div>	<div>X</div>	<div>○</div>	<div>○</div> <div>Swerving, turning</div>
2		<div>○</div> <div>Acceleration</div>	<div>○</div> <div>Cut-in</div>	<div>X</div>	<div>X</div>
3		<div>X</div>	<div>○</div> <div>Cut-in</div>	<div>X</div>	<div>X</div>
4		<div>X</div>	<div>○</div> <div>Cut-in, turning</div>	<div>○</div>	<div>○</div> <div>Swerving, turning</div>

図 58. 内部障壁による死角関連の認識限界シナリオ

3.4.2.9.2. 外部障壁(Outer Wall)による死角シナリオ

図 59 に示すように、自車両が車道の外側で壁のような構造物がある場所を走行する際に、その構造物のため、カーブおよび交差点の車両が認識できない。このため外部障壁は交差点やカーブの角度によって、前後車両が死角となる。また一般道においては、自専道と同様に構造物による死角の発生はあり、交差方向の違いと対向車の有無が違う点となる。これらを考慮し、死角の有無と車両挙動、それによる衝突可能性を評価する必要がある死角シナリオは図 60 のようになる。

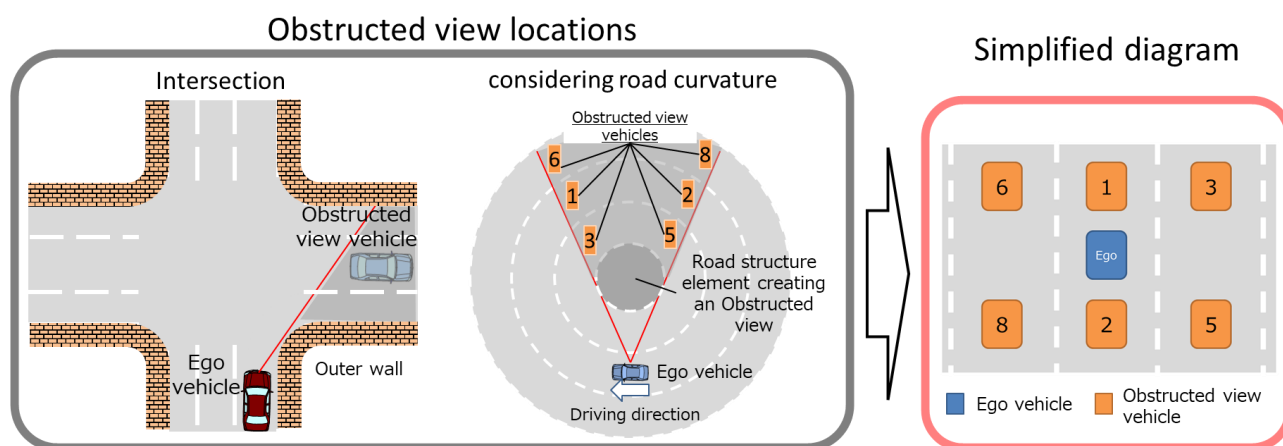


図 59. 道路の外部障壁に起因した死角の生成イメージ





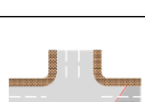
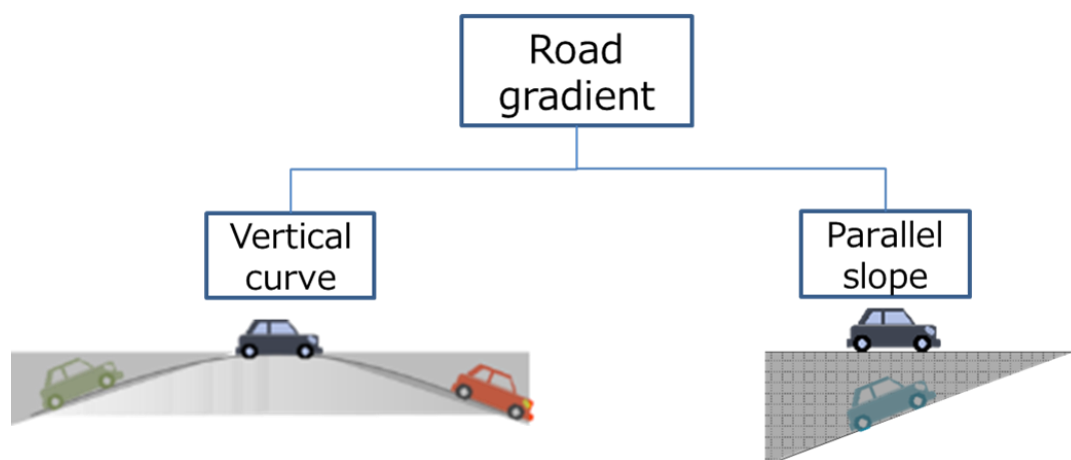
Outer barrier related Obstructed view pattern	Ego vehicle behavior	Blind spot vehicle's movement			
		Same direction		On coming	
		Obstructed view vehicle's behavior			
		Go straight /crossing	Lane changing /swerving/turning	Go straight /crossing	Lane changing /swerving/turning
	Going straight	○ Deceleration	○ Deceleration	○	○ Swerving, turning
	Lane change	X	○ Cut-out	○	○
	Going straight	○ Acceleration	○ Cut-out	X	X
	Lane change	X	○ Acceleration	X	X
	Going straight	○ Deceleration	○ Cut-in	○	○ Swerving, turning
	Lane change	○ Deceleration	○ Cut-in	○	○
	Going straight	○ Acceleration	○ Cut-in	X	X
	Lane change	○ Acceleration	○ Acceleration	X	X
	Going straight	○ crossing	○ Turning to same ego direction	○	○ Turning against ego direction
	Turning	○	X	○	○ Turning to intersecting direction

図 60. 外部障壁による死角関連の認識限界シナリオ

3.4.2.10. 道路勾配による死角シナリオ

道路勾配に関連した死角シナリオは、道路勾配特性と自車と死角車両の交通パターンに従って定義される。道路勾配による死角は同じ道路に沿った高低差によって死角が発生する。これらの特定の道路勾配は、縦断勾配および平行勾配として特徴付けられる(図 61)。



3.4.2.10.1. 縦断勾配シナリオ

縦断勾配(図 62)は、前方と後方に死角領域が発生する道路形状である。縦方向の道路勾配により、自車の視距が短くなるため、周辺車両(1、2、3、5、6、8)の位置と動き、および自車両自体の動きの組合せにより、潜在的に危険な交通パターンを作り出す。

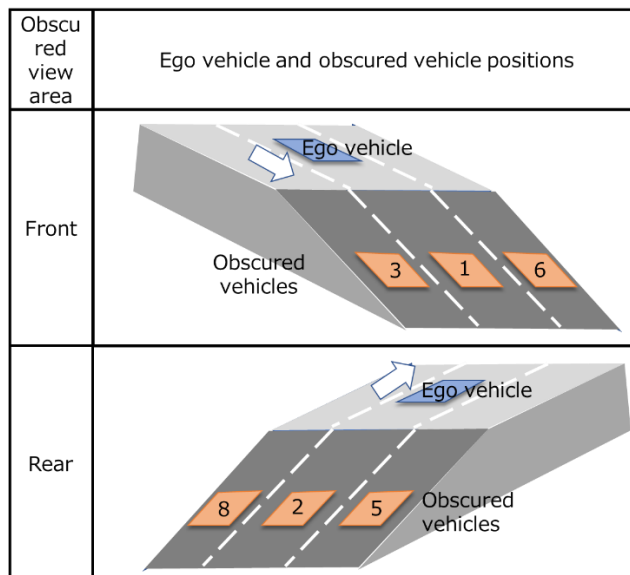


図 62. 縦断勾配に起因した死角の生成イメージ

ここで、自車両と死角に位置する車両との前後関係および交差点であれば左右方向を考慮して死角の有無と車両挙動、それによる衝突可能性を評価する必要があるパターンを図 63 に示す。

Obstructed view pattern	Driving direction	
	Same direction	On coming
1 	○ Cut-in, Deceleration	○
2 	○ Cut-in, Acceleration	X
3 	○	○
4 	X Turning to the obstructed vehicle direction	X

図 63. 縦断勾配による死角関連の認識限界シナリオ

3.4.2.10.2. 並行勾配シナリオ

合流路、分岐路などに見られる、隣接レーンがスロープ状に勾配することで発生する高低差により死角が生成される。ここで、道路形状と自車両と死角に位置する車両との進行方向に考慮して、死角の有無と車両挙動、それによる衝突可能性を評価する必要があるパターンを図 64 に示す。





Hight barrier related Obstructed view pattern	Ego vehicle behavior	Blind spot vehicle's movement			
		Same direction		On coming	
		Obstructed view vehicle's behavior			
		Go straight	Lane changing /swerving/turning	Go straight /crossing	Lane changing /swerving/turning
	Going straight	○ Deceleration	X	○	○
	Lane change	○ Deceleration	X	○	○
	Going straight	○ Acceleration	○ Cut-in	X	X
	Lane change	○ Acceleration	○ Both change to same lane	X	X
	Going straight	X	○ Cut-in	X	X
	Lane change	X	X	X	X
	Going straight	X	○ Cut-in	○	○
	Lane change	○ Deceleration	○ Both change to same lane	○	○

図 64. 並列勾配による死角関連の認識不調シナリオ

3.4.2.11. 通信外乱シナリオ

通信外乱シナリオとは、自動運転システムのセンサ、環境、通信機器などに起因して発生する 接続性の不安定化や情報伝送の劣化 により、周囲状況の把握が妨げられるケースを指す。通信外乱は、センサ認識系と異なり、デジタルマップや V2X (Vehicle-to-everything) といった通信インフラに依存する特性を持つため、外乱要因を体系的に分類・評価する必要がある。

通信外乱シナリオは、センサ、環境、送信機の 3 つのカテゴリに応じて、接続性に固有の特性を考慮して定義している(図 65)。

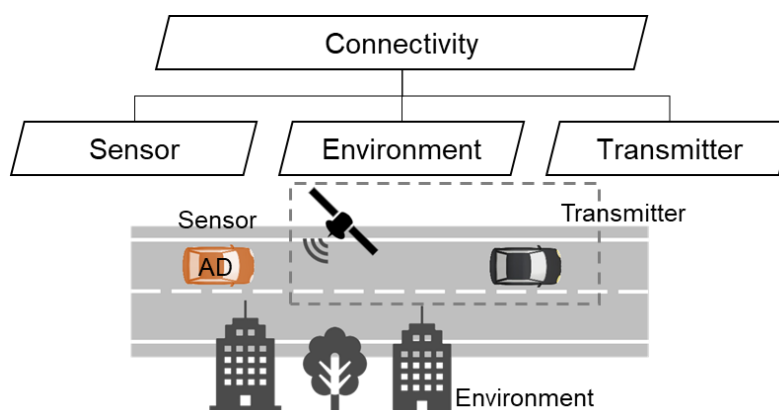


図 65. 通信外乱に関連する認識限界の分類

3.4.2.12. センサ分類

センサ関連の通信外乱は、図 66 に示すように、デジタルマップ要因の影響と V2X 要因に分類される。デジタルマップは、車両の測位やナビゲーションを補助するなど、自動運転システムに必要な機能を支援・実装するために利用される。さらに、デジタルマップは知覚センサと統合されることで、認識システム全体の信頼性を向上させる役割を果たす。

一方、V2X は車両が他車両、道路インフラ、歩行者、サーバなどと通信する仕組みであり、特に悪天候や複雑な交通環境において、自車周辺の状況を事前に把握できる点に利点がある。

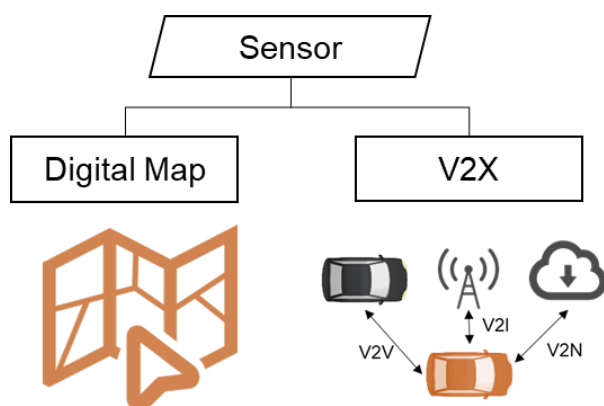


図 66. センサ通信外乱に関連した認識限界の分類

デジタルマップ関連の通信外乱とは、アルゴリズムの不備により地図データが正しく取得されない、あるいは収集のタイミングが不適切である場合を指す。例えば、一時的な車線閉鎖や道路曲率の変更が反映されず、古いデータが使用されるケースが該当する。また、センサフュージョンの動作に不具合がある場合には、デジタルマップと V2X の双方に影響を及ぼし、デジタルマップ・V2X・他のセンサが異なる情報を生成する状況が生じる可能性がある。

3.4.2.13. 環境分類

図 67 に示すように、環境に関連する通信外乱は 静的エンティティ、空間エンティティ、動的エンティティに分類される。これらは通信信号や測位信号を妨害し、その結果、死角を生じさせたり、デジタルマップや V2X の信号伝送を劣化させたりする可能性がある。

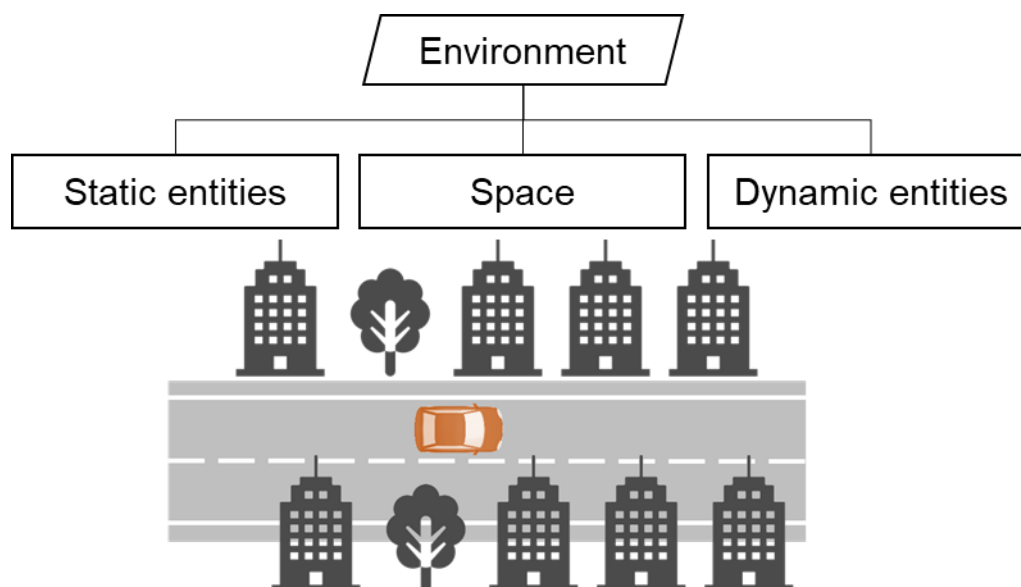


図 67. 環境の通信外乱に関連した認識限界の分類

- ・ 静的エンティティ: 道路側の物体(建物、樹木、トンネルなど)、高架下の物体(陸橋など)、地下構造物(駐車場など)
- ・ 空間エンティティ: 通信の接続性を阻害する要因であり、信号干渉や雨・霧による信号減衰などを含む
- ・ 動的エンティティ: 周囲の移動体が要因となるもので、他の車両、オートバイ、歩行者などが該当

3.4.2.14. 送信機分類

送信機関連の通信外乱は、図 68 に示すように、他の車両、インフラ、歩行者、サーバ、衛星 に分類される。送信機のエラーによって V2X メッセージが利用できなくなる、あるいは信頼性が低下する場合がある。また、衛星のエラーにより GNSS 信号が途絶、もしくは誤認される可能性もある。

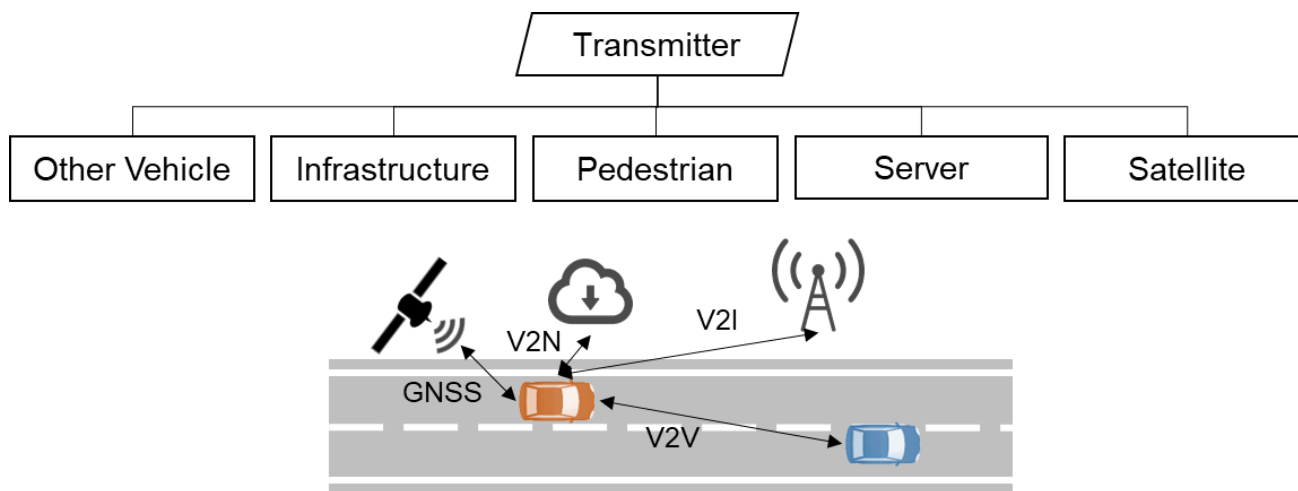


図 68. 送信機の通信外乱に関連する認識限界の分類

3.4.3. 車両運動外乱シナリオ

この章では、AD の安全性保証を目的とした車両運動外乱シナリオの体系や基準を設定するための考え方について説明する。まず、車両運動外乱における安全状態を「突発的な外乱により車両運動が変化しても事故を起こさないこと」と定義する。車両運動への影響は大きく 2 種類に分類できる。1 つは車体に外力が作用し、横・前後・ヨー方向の運動に影響を与える要素である。もう 1 つはタイヤ発生力が変動し、車両の横・前後・上下・ヨー方向の運動に影響を与える要素である（図 69）。これら 2 種類の入力、車両運動外乱シナリオを「車体入力」と「タイヤ入力」に分類する際の基礎となる（図 70）。

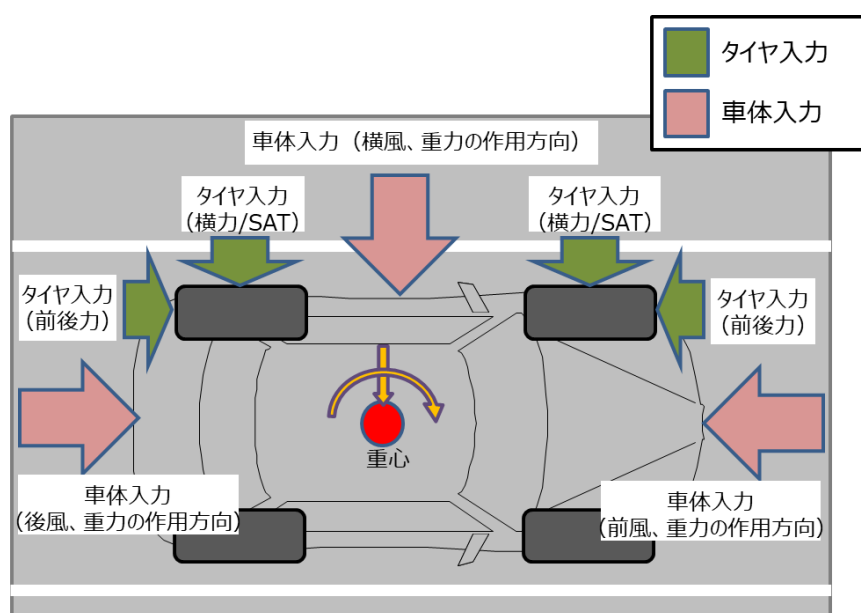


図 69. 車両運動外乱シナリオを定義するために考慮される外部からの物理的な力

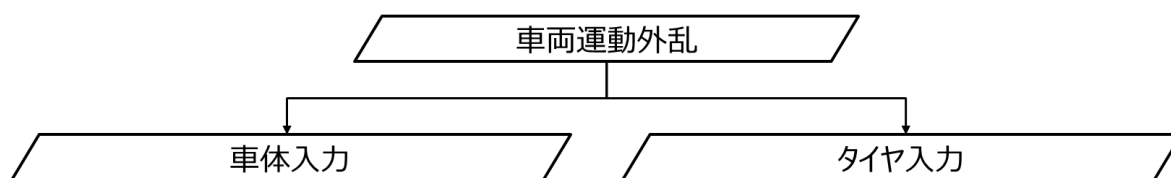


図 70. 車両運動外乱シナリオ体系

3.4.3.1. 車体入力の分類

車体に影響を与える要素は、道路形状と自然現象に分類できる(図 71)。道路形状には、曲線部の片勾配、縦断勾配、曲率が含まれる。一方、自然現象には、自然に発生する横風、追い風、向かい風がある。これらはいずれも車体に直接作用し、横・前後・ヨー方向の運動に影響を与える要素である。

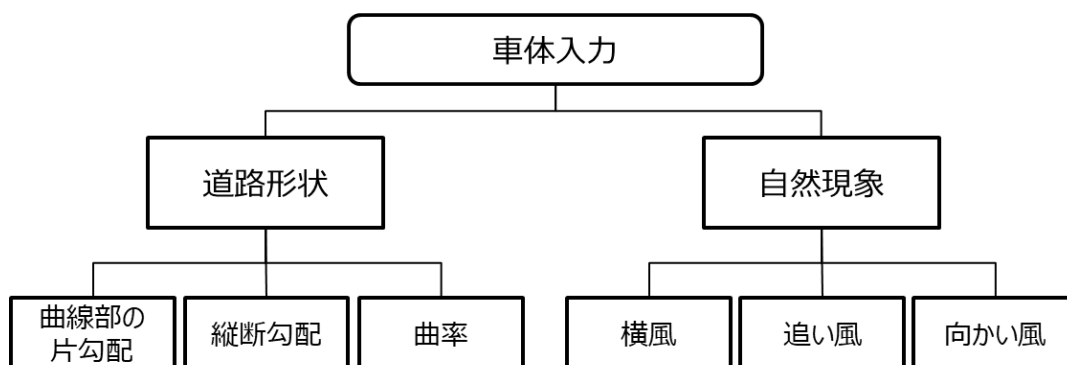


図 71. 車体入力に関するシナリオ体系

3.4.3.1.1. 道路形状

車体に作用する重力の方向は、道路形状(曲率や路面の傾斜)によって変化する。例えばカーブでは、道路の片勾配により重力の分力が横方向に作用し、車線逸脱のリスクが高まる可能性がある。また、上り坂では後方に、下り坂では前方に力が働き、速度変動を引き起こして他車との衝突リスクが増大する可能性がある(図 72)。

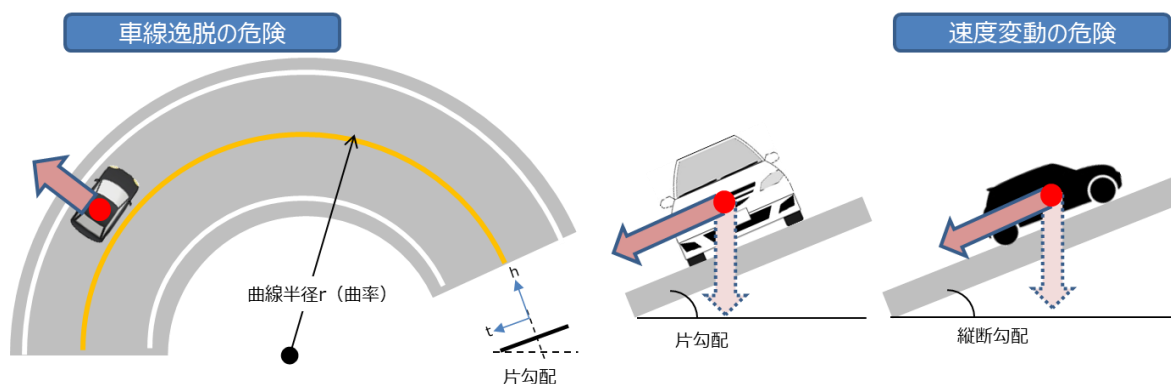


図 72. 道路形状の分類

3.4.3.1.2. 自然現象

自然に発生する突風や強風によって横方向や前後方向に力が加わると、車体を押され、車線逸脱や車速変動を引き起こす場合がある。その結果、他の車両との衝突リスクが高まる可能性がある(図 73)。

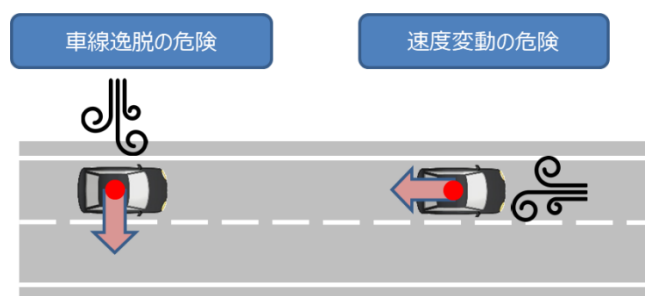


図 73. 自然現象の分類

3.4.3.2. タイヤ入力の種類

タイヤに影響を与える要素は、路面状態 と タイヤ状態 に分類できる。路面状態とは、タイヤに直接影響を及ぼす路面の変化を指す。例えば、路面とタイヤ間の摩擦係数は、不均一な表面や濡れた路面により変化し、グリップ力の低下を招いて車両安定性に影響を与える可能性がある。

一方、タイヤ状態とは、パンクやバースト、摩耗などによってタイヤ特性が大きく変化し、車両の不安定化を引き起こす要素である(図 74)。これらはいずれもコントロール不能を誘発し、潜在的に危険な状態をもたらす。

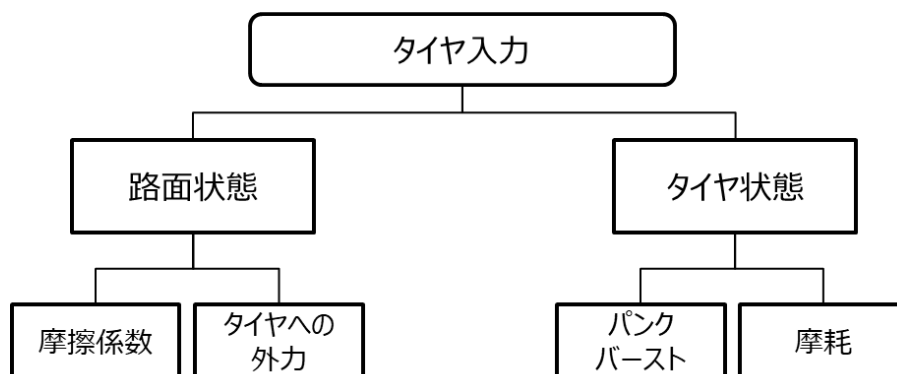


図 74. タイヤ入力に関するシナリオ体系

3.4.3.2.1. 路面状態

路面形状によっては、タイヤへの入力や路面摩擦係数(μ)の変化により、タイヤ力が変動し車両挙動に影響を及ぼす。例えば、路面の凹凸による外力や雨による摩擦低下により、車両の進行方向が変化し、場合によっては車線逸脱や車速変動を引き起こし、他車との衝突リスクが高まる恐れがある。したがって、路面状態は 摩擦係数 と 外力 に分類される(図 75)。

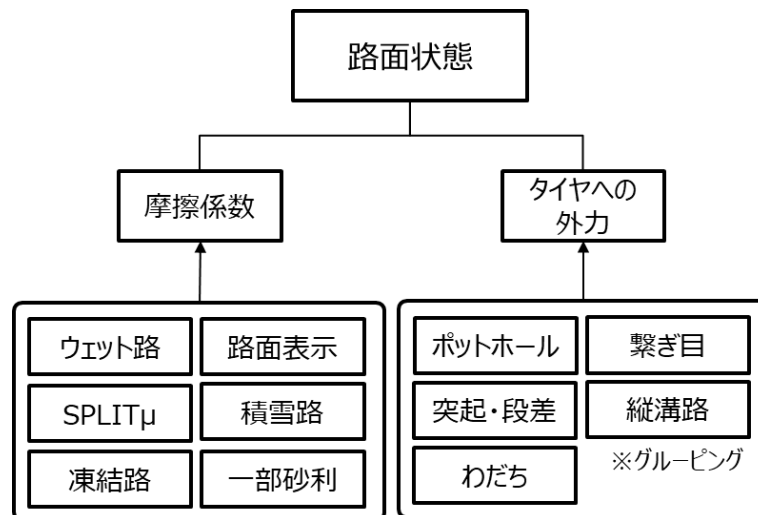


図 75. 路面状態の分類

ここで、タイヤと道路の摩擦係数に影響を及ぼす路面要因には、濡れた道路、凍結路、雪道、部分的な砂利などがある。例えば、乾燥路面から濡れた路面へ突然移動すると摩擦係数が低下し、車両の安定性に影響を与える可能性がある(図 76 左上)。

一方、路面に関係する外力は、ポットホール、突起、溝などによって発生する。例えば、車両が道路の段差や突起を越えると、タイヤに斜め上方向(右上)の力が急激に加わり(図 76 右上)、車両の進行方向が変化する。このような変化は計画軌道からの逸脱を招き、衝突リスクを高める恐れがある。

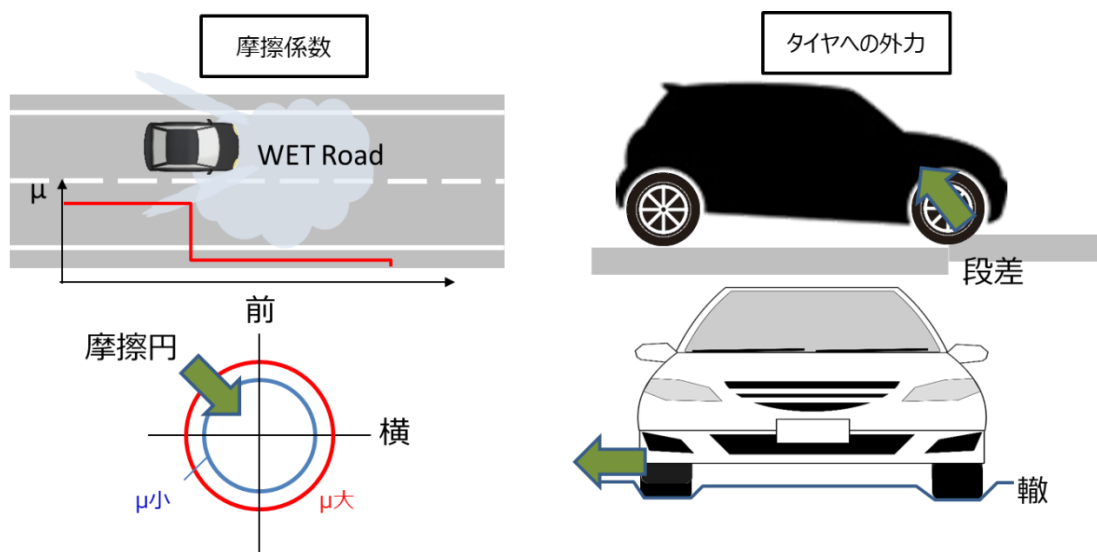


図 76. 摩擦係数の変化(左)とタイヤの外力(右)による路面状態に関する車両運動外乱

3.4.3.2.2. タイヤ状態

タイヤ状態とは、タイヤ特性が変動することで車両挙動に影響を及ぼす要因を指す。摩耗やパンク、バースト(図 77)によってタイヤ力が低下し、その結果、車線逸脱や車速変動を招き、他車との衝突リスクが高まる可能性がある。

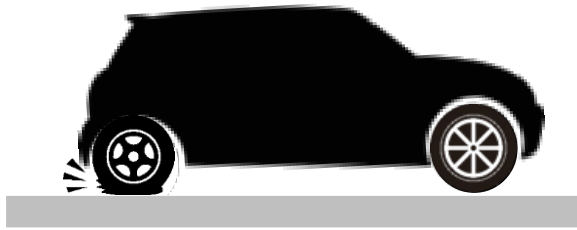


図 77. バーストによるタイヤ状態に関する車両運動外乱

3.4.3.3. 予測可能な車両運動外乱の安全アプローチ

この章では、予測可能な車両運動外乱に対する技術的安全アプローチを説明するに先立ち、まず 2 つの一般的な前提条件について述べる。

3.4.3.3.1. 前提条件

前提 1: 道路設計・維持管理・環境条件に関する常識

最初の前提は、車両が走行する道路の設計、維持管理、および環境条件に関する常識である。これは、合法性・倫理・エンジニアリングといった基本原則に従い、責任ある公共または民間機関によって道路が建設され、継続的に維持管理されることを意味する。

多くの国には、すべての免許取得者（年齢や技能に関係なく）が安全に走行できる道路を設計するための道路構造令がある。例えば日本では、設計速度 100km/h に対して、濡れた路面でも横加速度を 0.11G 未満に抑えられる曲線半径が規定されている。この基準を満たせない道路を建設する場合は、設計速度を引き下げる必要がある。

さらに、凍結路による摩擦低下や、路面の亀裂・隆起・ポットホールなどの劣化を迅速に検知する仕組みが必要である。また、自然環境についても、道路管理者は安全走行が可能な範囲を定め、災害レベルの暴風雨時には速度規制や通行止めを実施し、ドライバはその指示に従うことが求められる。自動運転車両もこの原則に従う。

したがって、道路設計・維持管理・環境条件に関する基準が遵守されない場合、車両が自動化されているか否かにかかわらず安全性は保証されない。AD 安全性保証フレームワークにおいては、このような状況を回避不可 (Unpreventable) と分類する。

前提 2: ADS オペレーターの責任

2 つ目の前提は、ADS オペレーターの責任に関する常識である。ADS は運転中の責任を負うが、運転者は走行前に車両状態を確認し、整備不良を認識していれば運行を避ける義務がある。具体的には、以下の状態は運行者責任に該当する：

- 法的検査基準を下回る過度のタイヤ摩耗
- タイヤ製造業者が推奨する値を下回る空気圧低下
- パンクの放置
- テンパタイヤ装着、スタッドレスやチェーン装着などにより本来の性能を発揮できない状態

このような条件下で ADS を作動させた場合、衝突を回避できない可能性がある。

3.4.3.3.2. 前提条件車両運動外乱に対する工学的安全アプローチ

前章で示した前提条件に基づき、予測可能な車両運動外乱に対する技術的な安全アプローチを導入する。基本となる考え方は、予見可能かつ回避可能なシナリオにおける衝突回避戦略と、予見可能だが回避不可能なシナリオにおける衝突緩和戦略を特に重視する。

したがって、回避可能な条件の範囲で車両運動外乱によって車両挙動が変化した場合、AD車両には走行を中断せずに安定制御を維持する能力が求められる。一方、外乱が回避不可能な不安定性を引き起こす場合には、AD車両は「ベストエフォート」戦略を適用し、発生し得る衝突の被害を最小化することが求められる。

図 78 は、この安全アプローチの具体例を示している。図 78 上段では、AD車両が濡れた路面においてすべり摩擦の急激な低下に直面しつつも、回避可能な条件に収まり、走行を中断せず安全に制御できるケースを示す。対照的に下段では、サマータイヤを装着した AD 車両が凍結路に遭遇し、摩擦の極端な低下によって回避不可能と定義される状態（例えば最大減速を伴う挙動）に陥ったケースを示している。



図 78. Preventable(上段)と Unpreventable(下段)な車両運動外乱に対する安全アプローチ

このように、車両運動外乱に対する安全アプローチは、車両制御可能な状態と不可能な状態を区分する明確な定義に基づいて構築される。そして車両運動の原理と回避条件の関係は、次の2つの工学的指標によって定義される。

1. 車両の作用力: 車両が走行する際に加わる力と、1つまたは複数の車両運動外乱要因(例: 道路形状、風、路面、タイヤ状態)によって誘発される力の合計。
2. 路面とタイヤの附着利用率(ε): 路面とタイヤ間の摩擦に基づく利用可能な附着率を示す指標。

図 79 は、この附着利用率 ε を基準に車両の運行領域を4つに分類している。

- 通常運行領域($\varepsilon \leq 30\%$): 通常走行に使用される範囲。
- 緊急回避領域($30\% < \varepsilon \leq 75\%$): AD車両が緊急回避操作に使用する範囲。
- 限界領域($75\% < \varepsilon \leq 100\%$): ABSが作動するような限界状態。
- 超限領域($\varepsilon > 100\%$): タイヤのグリップ力が失われる状態。

走行時に生じる作用力(図中の青矢印)が $\varepsilon \leq 75\%$ に収まる場合、車両の運動制御は物理的に可能であり、衝突回避戦略を適用できる。これに対し、 $\varepsilon > 75\%$ の場合は運動制御が困難となり、衝突緩和戦略を採用する必要がある。

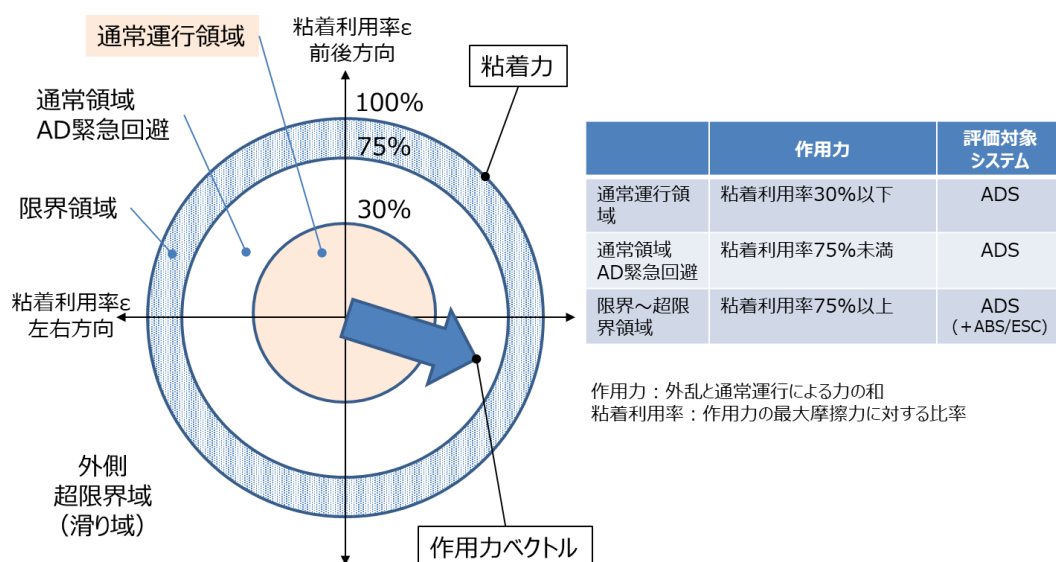


図 79. 車両運動外乱の安全アプローチを定義する車両の作用力と附着利用率の概念図

3.4.3.4. 車両運動制御の可能範囲

車両運動外乱は、車両に作用する力を動的に変化させ、運動制御を維持することが困難な領域へ移行させる可能性がある。図 80 は、作用力と摩擦係数を軸に、車両運動を制御可能な領域と制御が困難な領域を示している。

舗装道路のすべり摩擦係数は、一般的に以下の範囲にある：

- 乾燥時：0.5 ～ 1.0
- 湿潤時：0.3 ～ 0.9
- 凍結時：0.1 ～ 0.2

したがって、車両運動外乱による作用力が常に制御可能領域に収まるように、AD 車両には適切な運動制御戦略を設計・実装し、その性能をテストで確認する必要がある(図 80 の右下の緑色の三角形の領域)。

NOTE: すべり摩擦係数は一般に「ロック時」の値である。Müller らによる研究 (*Development of a Real-Time Friction Estimation Procedure*, 2017) では、雨天走行時のすべり摩擦係数はおよそ 0.6 程度であると報告されている。

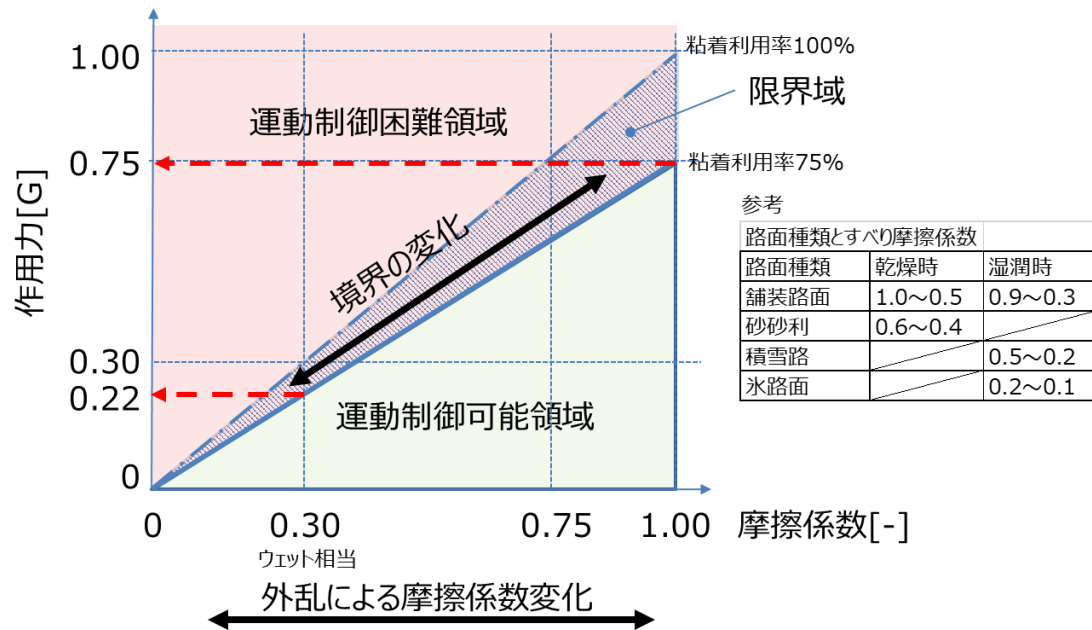


図 80. 車両運動制御の可能範囲

3.4.3.4.1. 車体入力 of 道路形状外乱に対する車両運動の制御可能性

道路形状において車両運動に最も厳しい条件は 曲線半径 である。日本の道路構造令では、道路の曲線部において安定して走行できるように最小曲線半径が定められている。この最小半径は、車両に作用する遠心力と路面摩擦の関係に加え、乗員にかかる遠心力や乗り心地とのバランスを考慮して設定されている。

設計速度 100 km/h の場合、最小曲線半径は 460 m(暫定措置では 380 m)と規定されている。横すべりに対して安定であるための速度、曲線半径、片勾配および横すべり摩擦係数の関係は以下の式で表される。

$$Z = \frac{G v^2}{g R} \quad \dots (1) \text{式}$$

ここで、

Z : 遠心力(N)

v : 自動車の速度(m/s)

g : 重力の加速度(=9.81m/s²)

G : 自動車の総重量(N)

f : 横すべりに対する路面とタイヤの摩擦係数

i : 路面の片勾配(=tan α)

R : 曲線半径(m)

横すべりを生じない条件は次式で与えられる

$$Z \cos \alpha - G \sin \alpha \leq f (Z \sin \alpha + G \cos \alpha) \quad \dots (2) \text{式}$$

(1)式を代入し整理すると

$$R \geq \frac{v^2}{127(i+f)} \quad \dots (3) \text{式}$$

さらに、摩擦係数 f (=横加速度) は次式で表される

$$f = \frac{v^2}{R+127} - i \quad \dots (4) \text{式}$$

例えば、設計速度 $V = 100 \text{ km/h}$ 、片勾配 $i = 6\%$ 、曲線半径 $R = 463 \text{ m}$ とすると、 $f = 0.11$ となる。つまり、日本の自動車専用道路では、横加速度 0.11 G (速度 100 km/h) で走行可能な構造となっている。この条件を満たせない道路形状(例: 雨量や地形の影響により附着力不足となる場合)では、制限速度を引き下げて設定する必要がある。従って、日本国内の自動車専用道路では、通常運行時に最大横加速度 0.11 G 相当の附着力を必要とする。

図 81 は、道路形状による外乱の最大値 (0.11 G) を基準線として示している。例えば、ドライ路面(摩擦係数 0.75)の場合、残余作用力は 0.45 G ($= 0.56 \text{ G} - 0.11 \text{ G}$)、ウェット路面では 0.12 G となる。したがって、車両運動外乱の評価では、道路形状を常に考慮し、他の外乱要素と組み合わせた作用力の総和が運動制御可能領域に収まる必要がある。

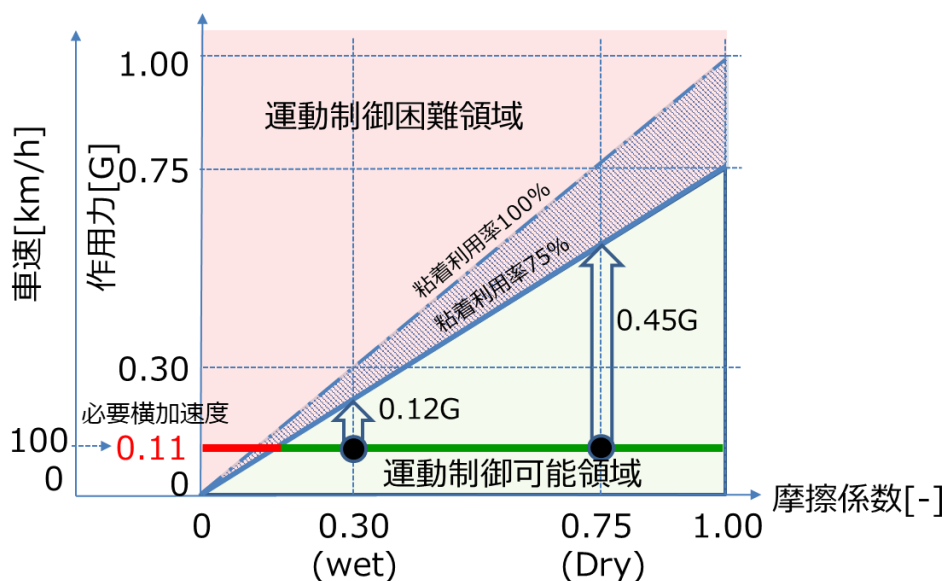


図 81. 道路形状に対する摩擦係数と作用力の関係

車両運動外乱の要素は必ずしも単独で発生するとは限らず、複数の要素が同時に作用する場合を考慮する必要がある。実際の環境下では、例えば降雨中にカーブを走行している際に横風を受けるといった状況が発生し得る。

路面状態(ドライ、ウェット、積雪路など)は摩擦係数で表現でき、道路形状や自然現象(例: 横風)、さらにはタイヤへの外力(例: 路面の凹凸)は作用力として定義できる。また、パンクは附着利用率が 100% 発揮できない状態として表現可能である(図 82)。

このように、車両運動外乱は個々の要素ではなく、要素の組み合わせとして評価することが重要である。

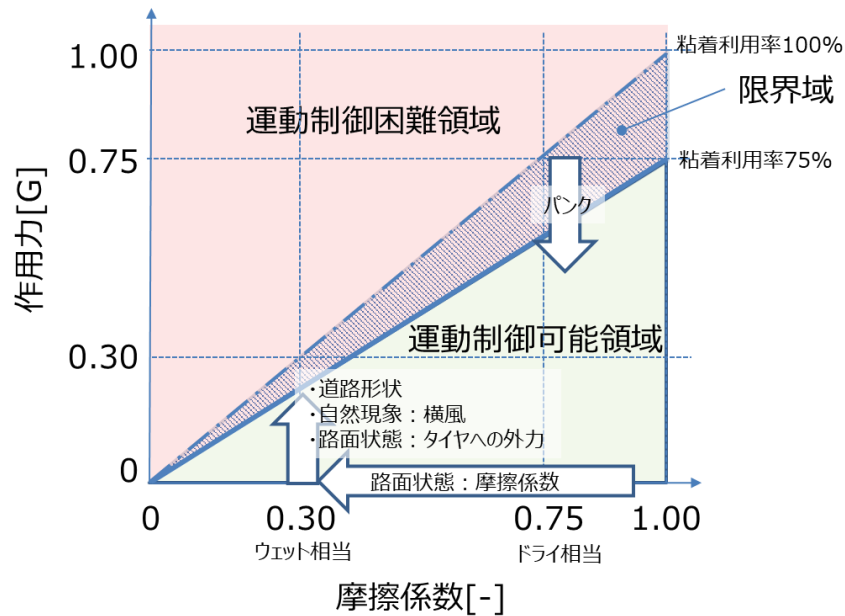


図 82. 車両運動外乱における要素の組み合わせと関係

3.4.3.4.2. 車体入力 of 自然現象外乱に対する車両運動の制御可能性

自然現象である風の外乱は、作用力として加算される。つまり道路形状における必要な作用力 0.11G に加算される。ここで、横風による作用力は、車両の形状と大きさによって変わる。例えば、図 83 にあるように風速 10m/s においてセダン相当及びミニバン相当ではこの程度の差がある。また風速 20m/s ではセダン相当でも附着率 75%を超える領域、つまり運動制御困難な領域になる。この場合ベストエフォートで対応する必要がある。しかしながら、日本の自動車専用道路では 10m/s 以上の風速があると速度規制が行われ、道路形状で必要な作用力が下がるため、10m/s 以上の風速でも安全に走行ができる。従って日本の自動車専用道路では風速に対する速度規制が設定されているため、100km/h で走行可能な風速 10m/s 未満が風速に関する境界となる。

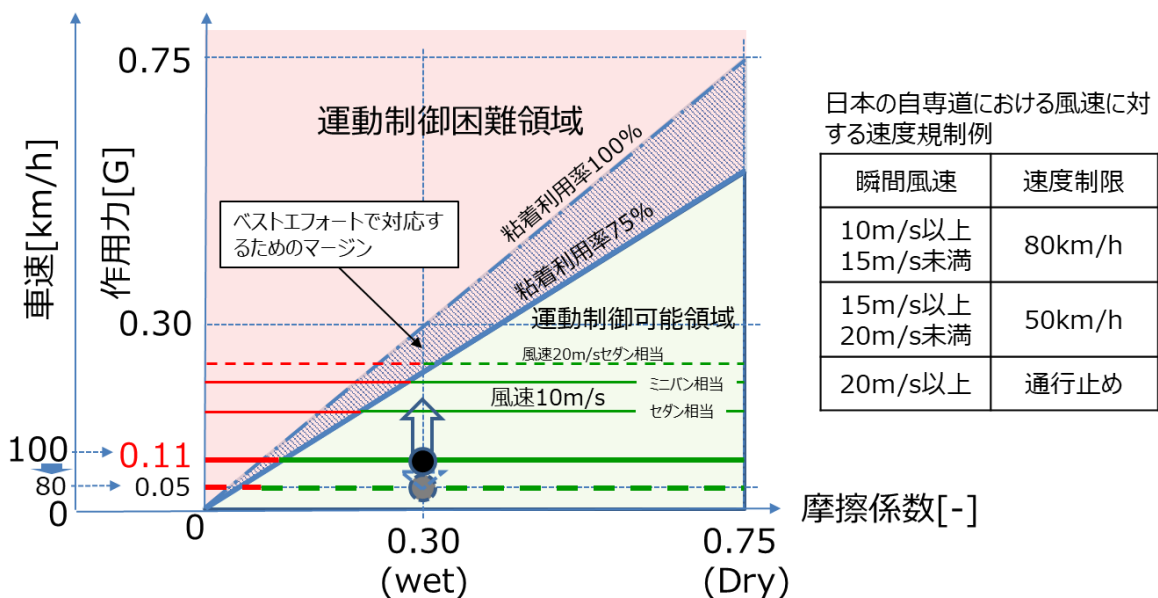


図 83. 自然現象(横風)に対する摩擦係数と作用力の関係

3.4.3.4.3. タイヤ入力路面状態外乱に対する車両運動の制御可能性

日本の自動車専用道路では、表（日本の自動車専用道路における気象状況に対する速度規制例）に示すように、気象条件に応じて速度規制が実施される。したがって、速度規制が適用されない気象条件が安全境界値となる。

具体的には、設計速度 100 km/h 走行時において雨量 20 mm/h 未満の場合はハイドロプレーニングが発生せず、摩擦係数 0.3(ロック μ) 以上を境界値とすることができる。一方、雨量が 20 mm/h 以上になるとハイドロプレーニングが発生し摩擦係数が大幅に低下する。また、凍結路や積雪路では摩擦係数が 0.2 以下に低下し、先に述べた横風の影響も加わることで運動制御可能領域に収まらなくなる。したがって、ノーマルタイヤを常用する一般的な走行環境においては、摩擦係数の境界値はウェット路面相当の 0.3 である（図 84）。

さらに、深い段差やポットホールなどによる外力はタイヤに作用し、車両挙動を乱す恐れがある。道路管理者は安全な道路環境を維持する責任を負っており、そのため修繕要否判断の目標値が設定されている（表 31）。この目標値以下であれば、通常のドライバが安全に走行できることが期待される。従って、タイヤ外力に関する境界条件もこれらの目標値に基づき、横風と同様に作用力として加算される。

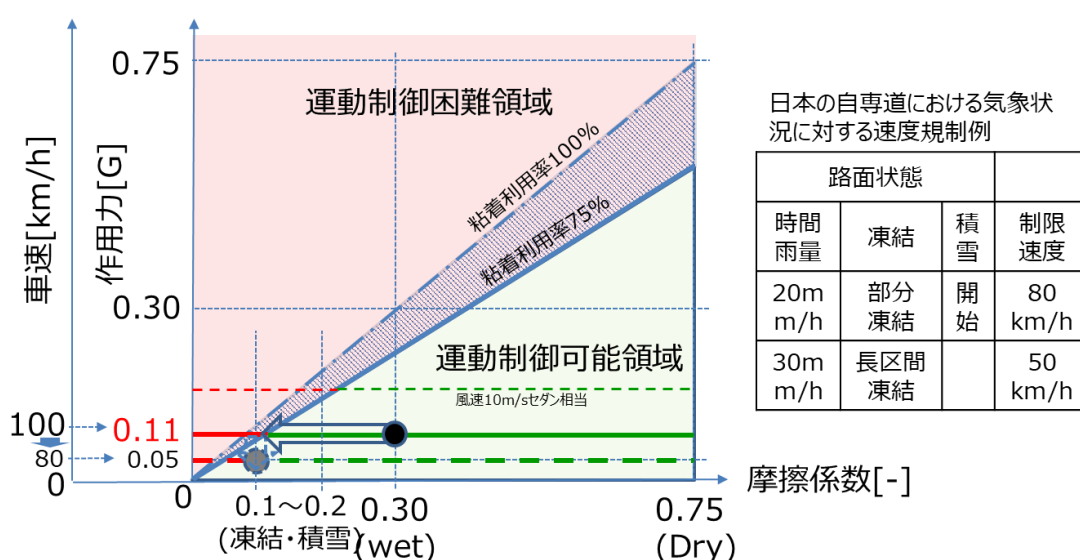


図 84. 路面状態に対する摩擦係数と作用力の関係

表 31 維持修繕要否判断の目標値

道路の種類 \ 項目	わだち掘れ及びラベリング (mm)	段差 (mm)		すべり摩擦係数	縦団方向の凹凸 (mm)	ひびわれ率 (%)	ポットホール径 (cm)
		橋	管渠				
自動車専用道路	25	20	30	0.25	8mプロファイル 90(Pr) 3mプロファイル 3.5(σ)	20	20
一般道 (交通量多)	30~40	30	40	0.25	3mプロファイル	30~40	20
一般道 (交通量少)	40	30	---	---	---	40~50	20

3.4.3.4.4. タイヤ入力のタイヤ状態外乱に対する車両運動の制御可能性

走行中のパンクは作用力を増加させるのではなく、附着利用률을 100%以下に低下させる事象である。SAE (*Tandy, Ault, Colborn, & Pascarella, 2013*) の報告によれば、1 つのタイヤがパンクしてもリムが地面に接地しない限り、約 0.6G まで車両をコントロールできるとされている。これは附着利用률이 60%まで低下することを意味する。

この程度の低下では直ちに危険な状態には至らないが、バーストを起こしてリムが地面に接地する前に、運転者またはシステムが適切に検知し、安全に停止することが求められる。

4. シナリオデータベース

4.1. 3つのシナリオ抽象化レイヤ

最上位の定性的なシナリオ構造を定義する Functional scenario は、運転行動の3要素である「認知」「判断」「操作」に基づき、「認識不調」「交通外乱」「車両運動外乱」の3つのカテゴリで体系的に構造化することで、包括的なシナリオ評価が可能になる。

Logical scenario は、構造化された Functional scenario に対して、定量的なパラメータ範囲を付与したもので、例えば交通外乱においては交通流データから車両の軌跡を抽出し相対速度やカットイン速度などの交通流パラメータを統計分布から定義するデータ駆動型アプローチによって定義できる。なお、交通流データは、交通監視及び運転データ、事故データベース、地図及び道路データ等を指す。

Concrete scenario は、具体的に評価を行う一つ一つの評価条件であり、安全状態と不安全状態を区別できる安全性判定の境界等から抽出することが考えられる。(3.1.1.2 章)

4.2. シナリオデータベースのコンセプト

前述の 3 つのシナリオ抽象化レイヤを開発プロセスにつなげるシナリオデータベースの概念について述べる。はじめに、図 85 にデータ駆動型 AD 安全シナリオの開発と適用プロセスの概念を示す。当局が示す基準を達成するために、Functional scenario、Logical scenario、Concrete scenario のレイヤを用いて合理的に予見可能かつ防止可能な範囲を具体化する。この時、各シナリオは実データによって客観的に定義されることが望ましい。したがって、シナリオデータベースは合理的に予見可能(Reasonably Foreseeable)な Logical scenario および防止可能な Concrete scenario を提供することを主な目的とする。なお、合理的に予見可能な Logical scenario および防止可能な Concrete scenario の定義方法の詳細は後述する。

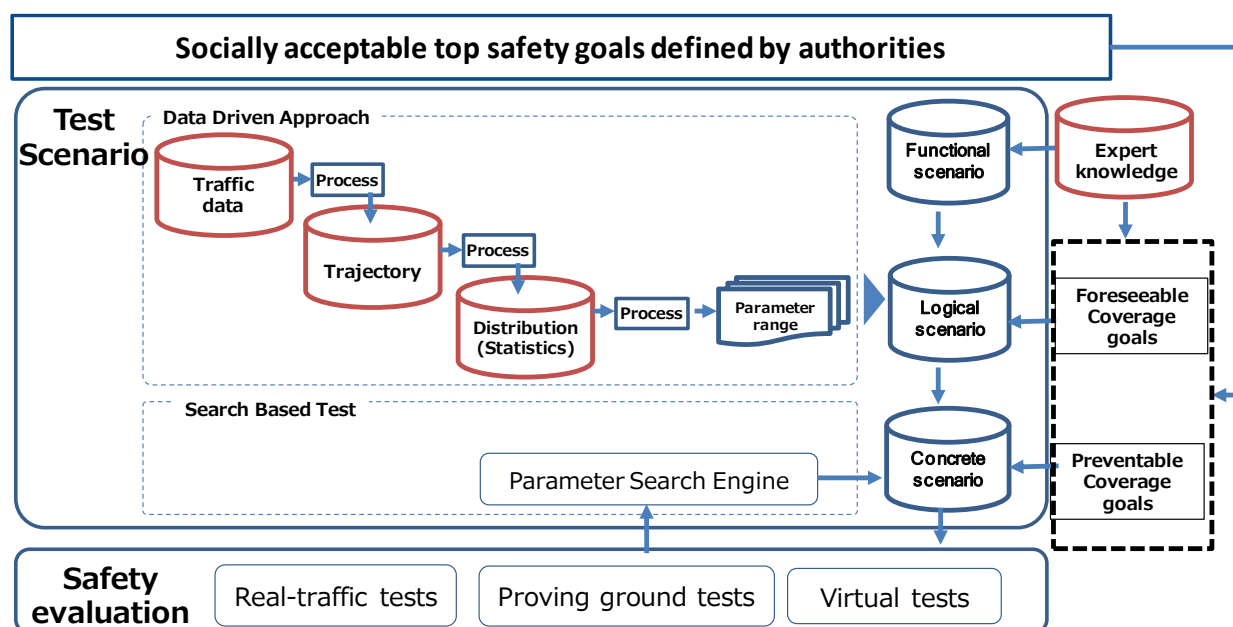


図 85. データ駆動型 AD 安全シナリオの開発と適用プロセス

4.3. 標準化シナリオに基づくAD 安全性評価のための情報フローのスキーム

図 86 は、シナリオカタログから具体的なテストシナリオを作成し、これらのシナリオを標準化された形式で出力するために必要な情報フローのスキームを示している。さまざまなシミュレーション環境に適応できる汎用性のある標準化されたデータフォーマットは、AD 安全性評価に有益である可能性がある。車両の動作および道路形状に関する情報を含むファイルは、シナリオカタログからテストデータジェネレータによって生成される。これらのファイルは、コンバータを介してさまざまなシミュレーション環境に適用することができ、市販されている特定のソフトウェアから独立させることが可能である。

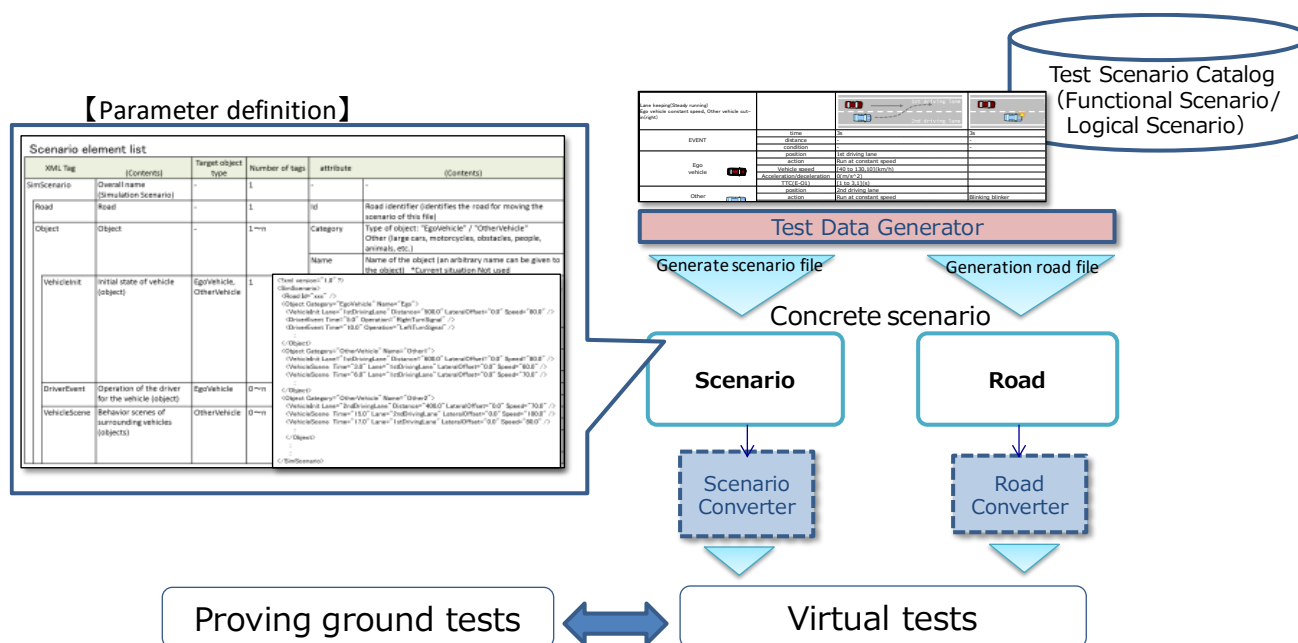


図 86. 標準化シナリオに基づくAD 安全性評価のための情報フローのスキーム

4.4. テストシナリオデータベースのインタフェース仕様

図 87 にシナリオデータベースの体系を示す。シナリオデータベースは、実際の交通観測データを入力に、安全性評価に必要なシナリオデータを出力する。これを実現するための入出力インタフェースが必要である。また、出力されたシナリオデータで安全性評価を実施し、その結果をシナリオデータベースにフィードバックする。

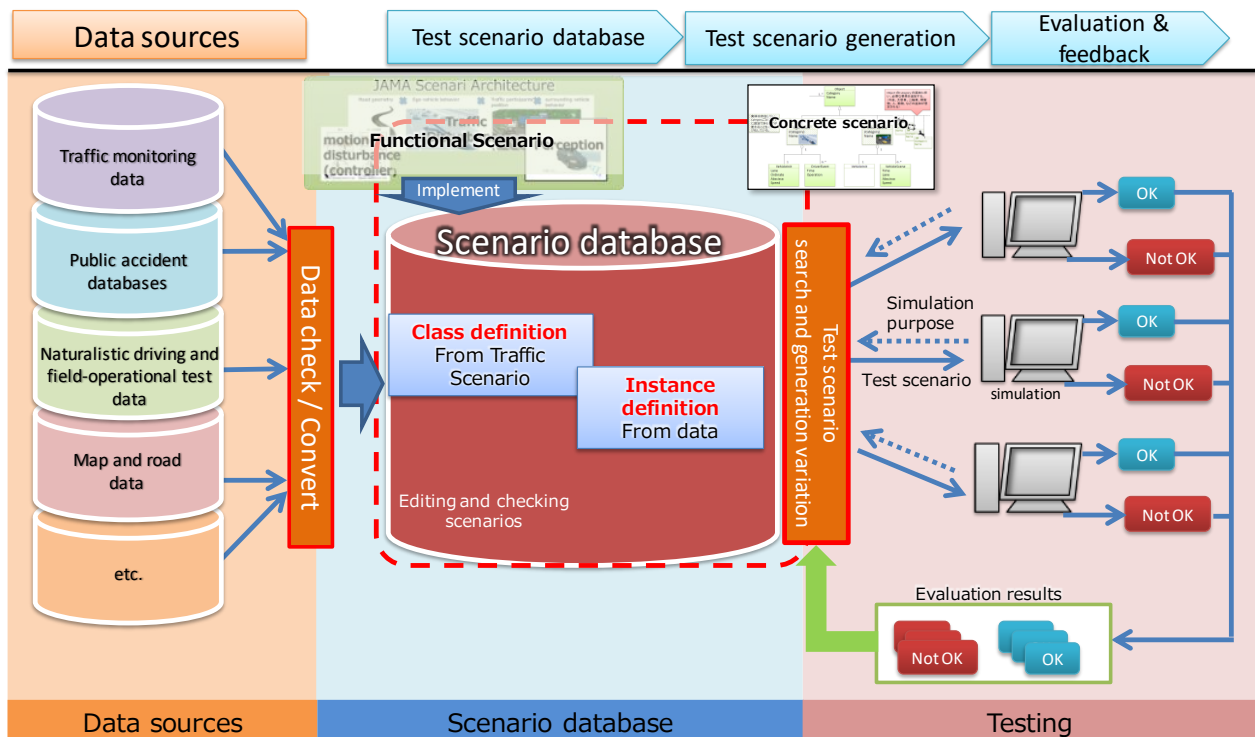


図 87. シナリオデータベースのスキームとインタフェース

交通モニタリングデータ、事故データ、フィールドテスト収集データ、地図および道路データなど、実際の交通データは多岐に渡る。これら不特定多数の実データをシナリオデータベースに取り込むためには、必要な情報を取り出し、適切なフォーマットへの変換が必要である(図 87 の Data check/Convert)。共通のデータベースに適切に取り込まれたデータは、標準化された方法論に従いシナリオを生成することが可能である。

シナリオデータベース内に生成されたシナリオを利用するために、シナリオの検索、生成およびエクスポートを可能とするインタフェースが必要である(図 87 の Test scenario search and generation variation)。

5. 合理的に予見可能な範囲(Reasonably foreseeable)の詳細

5.1. 実交通データに基づく合理的に予見可能な Logical scenario の概要

Logical scenario の定義方法は、道路交通法や国際基準などのルールに基づいて決める手法や、様々な交通データに基づいて決める手法などが挙げられる。ここでは、実交通データに基づき合理的に予見可能な範囲を定量化する一手法について述べる。自動運転車が遭遇する場面が図 23 および図 27 のように Functional scenario として類型化されたと仮定すると、各シナリオの代表的なパラメータを定義し、その範囲を同定することで、合理的に予見可能な Logical scenario を定量化できる。図 87 に合理的に予見可能な Logical scenario 定義までのプロセスを示す。

はじめに、実交通環境データを計測車両や定点カメラによって取得し、車両軌跡データは道路線形に沿った座標系(進行方向およびそれに直交する方向)に変換されデータベース化される。ここから該当する Functional scenario を抽出し、シナリオ毎に定義された代表パラメータを抽出する。

次に、抽出されたパラメータの発生確率分布推定を行う。パラメータ間の相関を考慮して、相関のあるパラメータは多次元分布を導出し、独立したパラメータは独立した確率分布を導出する。これらの発生確率の積が任意のパラメータ組み合わせの発生確率として推定される。この発生確率をもとに、社会受容性などによって考慮された閾値以上のパラメータ組み合わせを合理的に予見可能と考えることができる。

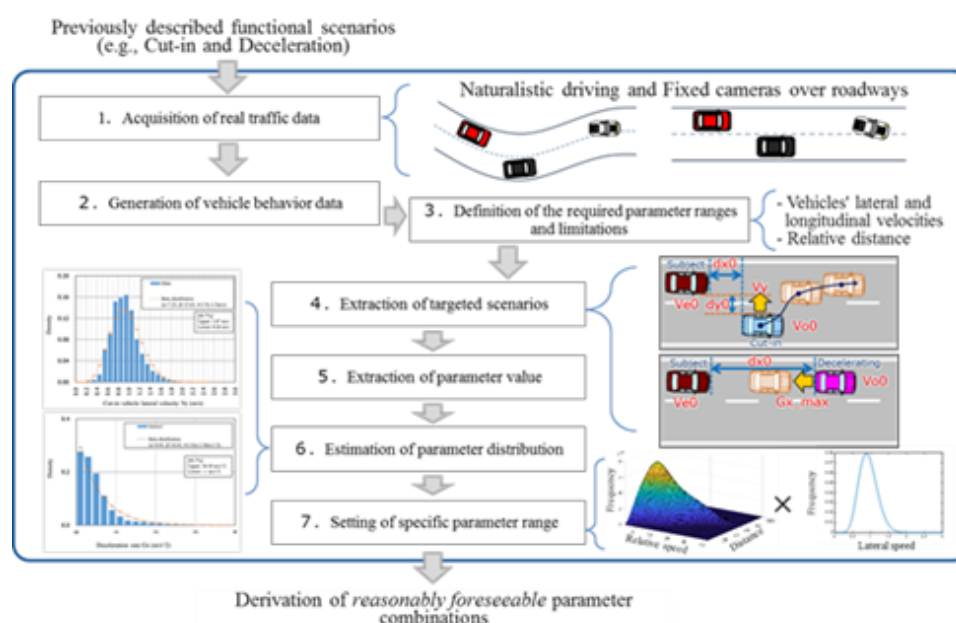


図 88 Logical scenario 化のプロセス

5.2. 国内自動車専用道路におけるカットインシナリオ(No.4)の Logical scenario 定義

自動運転車の前方に他車がかットインするシナリオを例に、合理的に予見可能な Logical scenario を定義するまでプロセスを述べる。カットインシナリオは図 88 および表 32 のようにパラメータを定義し、以下の条件を満たす場合に一連の時刻歴データが抽出された。

- 1) 自車よりも他車の縦速度が遅い
- 2) 車間距離が 100m 以内
- 3) 他車の横速度が 0m/s から一方向に増加(または減少)し、0m/s に戻る
- 4) 3)の間に自車の隣接車線から自車のいる車線に移動している
- 5) 自車と他車の間に他の車両がない

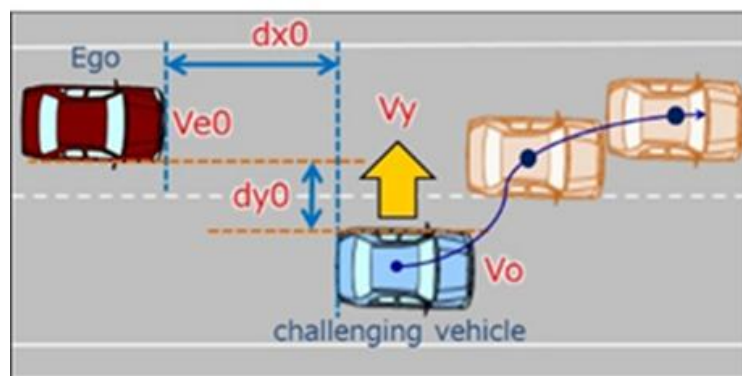


図 89 カットインシナリオ (No.4) のパラメータ

表 32 カットインシナリオ (No.4) のパラメータ

パラメータ名	変数	単位	備考
自車縦速度	V_{e0}	km/h	シナリオ開始時の値を抽出
他車縦速度	V_{o0}	km/h	シナリオ開始時点の値を抽出
相対速度	$V_{e0} - V_{o0}$	km/h	シナリオ開始時点の値を抽出
前後車間距離	$dx0$	m	シナリオ開始時点の値を抽出
他車横速度	V_y	m/s	最大値を抽出

前述の表 32 の備考欄に書かれた条件に基づき、抽出された時刻歴のシナリオデータからパラメータ値(スカラー)を導出し、それぞれのパラメータの分布、およびパラメータ間の相関を分析した(図 90 参照)。自車速度に対して、相対速度の上限値が依存しており、同様に相対速度と車間距離に相関関係がみられる。一方で、他車横速度はいずれのパラメータに対しても相関が弱く、独立であることがわかる。このことを考慮すると、遭遇するカットインのパラメータ組み合わせの頻度は、図 91 のように相対速度と車間距離の多次元頻度分布を推定し、他車横速度の頻度分布との積を求めることで算出できる。得られた頻度分布から合理的に予見可能なパラメータ範囲を定義することができる。

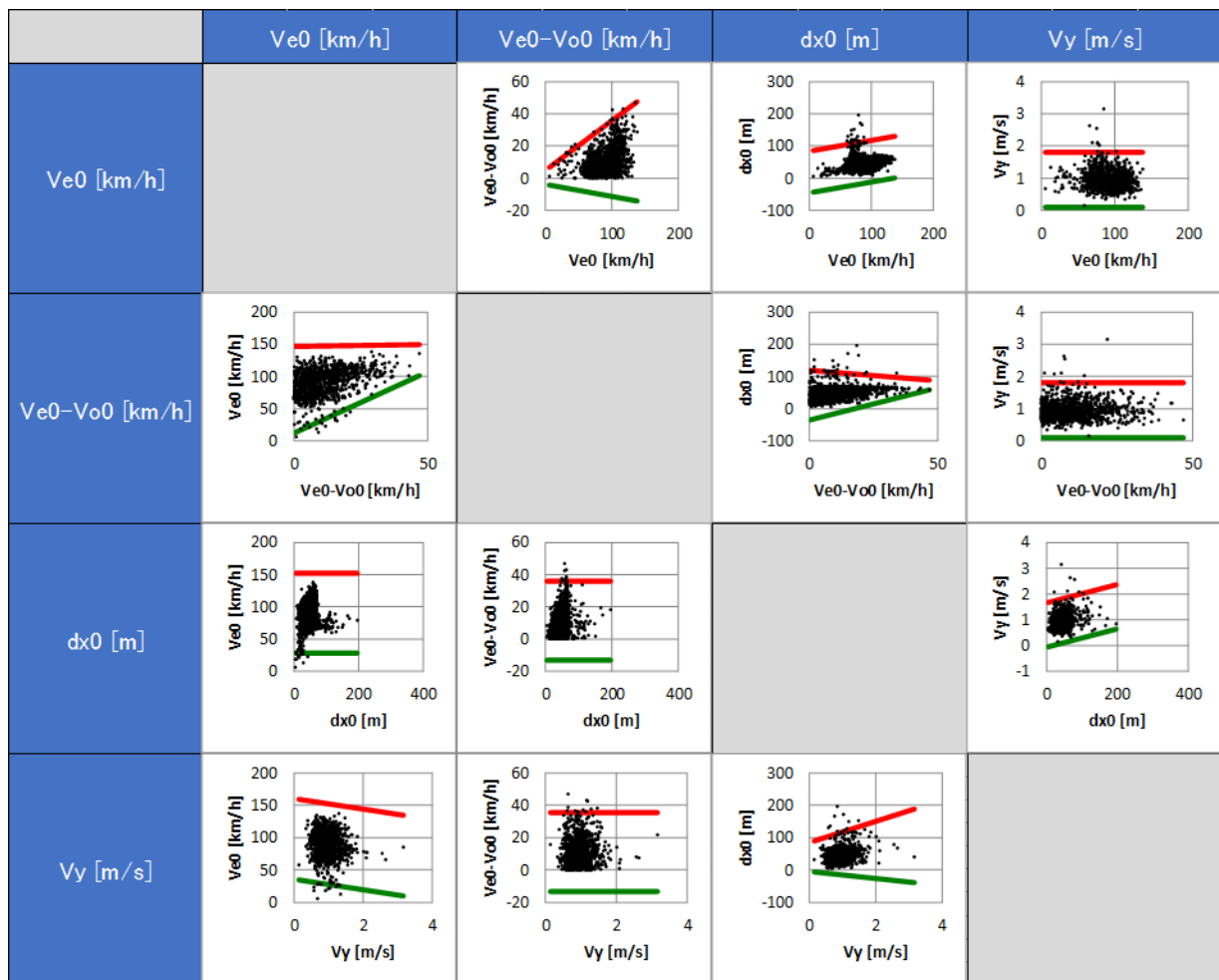


図 90 カットインシナリオパラメータ間の相関分析

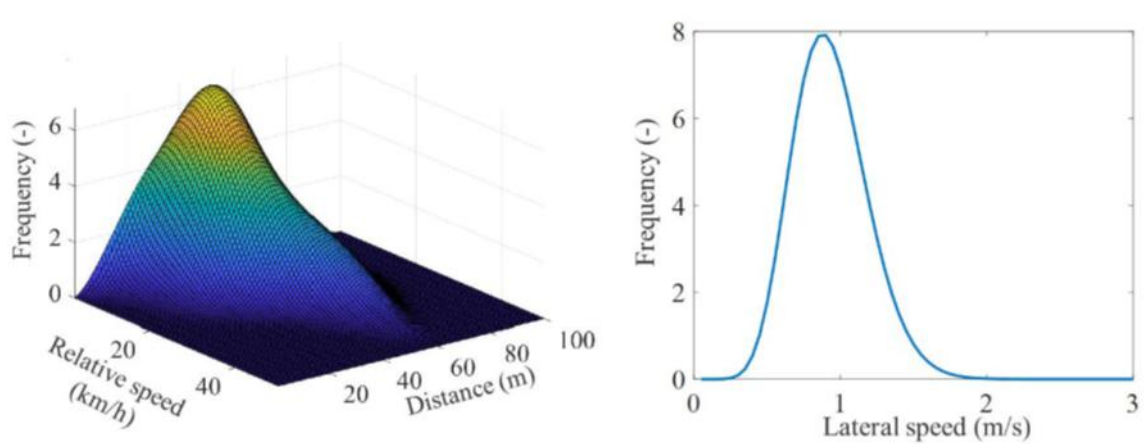


図 91 カットインシナリオパラメータの頻度分布

(出典: Nakamura et al., 2022, *Defining Reasonably Foreseeable Parameter Ranges Using Real-World Traffic Data for Scenario-Based Safety Assessment of Automated Vehicles*)

6. 安全性の判定方法(Preventable)の詳細

本章では、3.3.1 項の交通外乱の安全性判定手法において述べた C&C Driver のパフォーマンスを定義するための考え方を示すとともに、実験データが示す定量的な根拠によってパフォーマンスを定義した具体例を説明する。

6.1. C&C Driver を定義する考え方

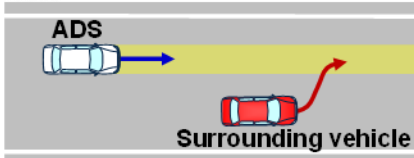
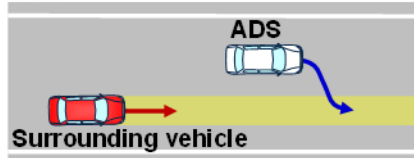
6.1.1. 自動運転車の役割に応じた安全要件

自車のふるまい等の要素の組合せで表現される交通外乱シナリオでは、自車と他の交通参加者との相対的な関係の違いによって安全要件が異なる側面がある。例えば、本線を自車がレーンキープしているところに他車がカットインするシナリオでは、衝突の回避あるいは衝突時の被害軽減をできる限り実行することが求められる。一方、本線をレーンキープしている後続車の前に自車がレーンチェンジするシナリオでは、後続車との衝突を回避することに加えて後続車の進行妨害を回避することが求められ、これらを避けられない状況ではレーンチェンジの実行を中断することが求められる。

自動運転車の役割によって安全要件が異なることについて、Kusano ら(2023)は表 33 が示すように他者が衝突リスクを引き起こした事象に対して反応する役割を担うという意味での Responder、自動運転車が他車に対して衝突リスクを引き起こさない役割を担うという意味での Initiator という概念で説明している。自動運転車が Responder となるシナリオにおいては、衝突リスクに対する認識・判断・操作が優れているドライバのパフォーマンスを定義する必要がある。一方、自動運転車が Initiator となるシナリオにおいては、他車のドライバが進行を妨害されたと感じる相対的な関係を明らかにし、進行妨害とならない余裕(相対距離、時間差等)を定義する必要がある。

このように自動運転車には二つの異なる役割があるため、安全性評価の対象となるシナリオにおける役割に応じて安全性判定手法を切り替えなければならない。

表 33 自動運転車の役割によって異なる安全要件

	Responder role	Role inversion	Initiator role
Scenario	No.1 		No.7 
Safety requirement	- Strive to achieve utmost effort for collision avoidance or damage mitigation while surpassing the performance of human driver		- To temporarily withhold lane change to prevent collisions and avoid obstructing the rear vehicle - To complete the lane change appropriately
Research subject	Quantification of a competent and careful driver behavior		Quantification about the subjective experience of the rear vehicle driver's feelings

6.1.2. 衝突リスクの回避手段の種類

一般的に交通事故に関する衝突リスクを回避する手段にはブレーキとステアリングが挙げられ、状況によってはブレーキとステアリングの双方を用いることが考えられる。ステアリング回避は、ブレーキ回避の限界を超えた状況であっても有効であることが期待できる一方、ステアリング操作によって周囲の交通参加者に対する新たな衝突リスクを生じることが考慮しなければならない。

したがって、本稿において検討する Responder の役割の C&C Driver は、自車に対して迫りくる衝突リスクをブレーキ操作によって回避を実行することを前提として構築する。

6.1.3. ドライバによる衝突回避プロセスの構成要素の分解

ドライバがブレーキによって衝突リスクを回避することを対象とした場合、基本的なプロセスは図 92 が示す運転行動要素に分解して説明できる。反応時間の研究では、人間がある刺激に対する外敵に観察可能な反応が生じるまでの処理過程を刺激の知覚、判断や反応選択、反応の運動実行の 3 つに分けられることが多い。これらの処理過程を自動車の運転に適用すると、ドライバが衝突リスクの存在に気づいてブレーキによる回避が必要であることを判断するプロセスが Risk Perception Situation(A)であり、ブレーキによる回避を判断した後にアクセルペダルからブレーキペダルに足を踏みかえてブレーキペダルを踏みこむ身体動作を行うプロセスが Delay in time(B)であり、ブレーキペダルの踏みこみ量に応じて減速度が作用するプロセスが Deceleration degree and Max. G-force(C)である。

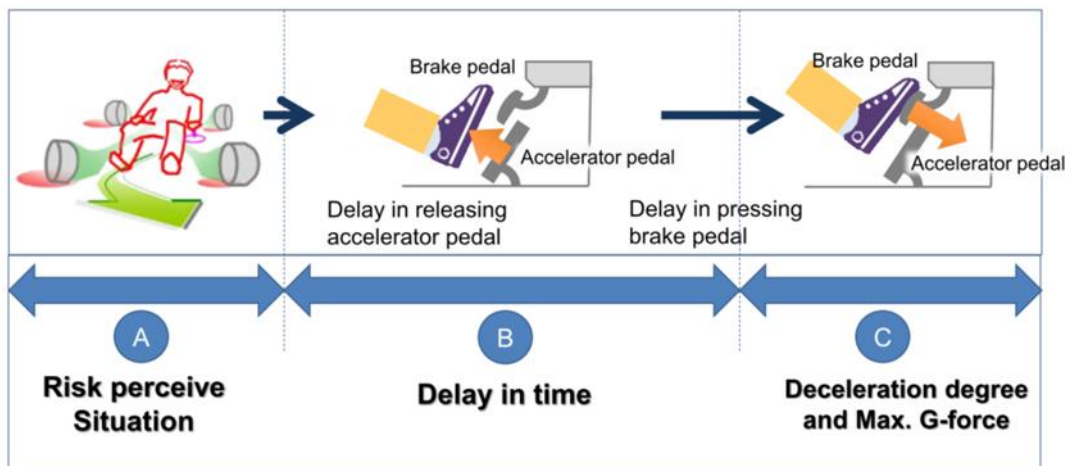


図 92 ドライバのブレーキによる衝突リスク回避の基本的なプロセス

人間の反応時間は課題の内容に応じて3種類が区別され、単純反応時間(SRT: Simple Reaction Time)、選択反応時間(CRT: Choice Reaction Time)、弁別反応時間(DRT: Discriminative Reaction Time)と呼ばれている。

交通外乱シナリオのうち、自車の前方に隣接する車線から他車がカットインをする場合、他車は車線内を走行するために一定の範囲で左右に動いているのか、あるいは、カットインをするために特定の方向に連続的に動いているのかをドライバは弁別しなければならない。したがって、このようなシナリオの場合は、他車がカットインする・しないの弁別に要するプロセスを考慮する必要がある。

自車の前方に他車がカットインするシナリオにおけるドライバのブレーキに関するプロセスは図 93 で示すことができる。このとき、ドライバがカットインであることを判断するためには、他車が左右方向に動いたこと

とレーンキープのための範囲を超えて動いたことが条件となる。したがって、自車の走行車線に向かう他車のカットインすることを弁別するための所要時間を定義することが必要であり、これを危険判断時間という。

危険判断に続いて、ブレーキ操作を行うためのアクセルペダルのリリースとペダルの踏みかえがあり、ブレーキペダル操作後に車体に減速度が発生することになる。

このシナリオでは自動運転車は Responder の役割となるため、このシナリオの安全性を評価する C&C Driver モデルはそれぞれのプロセスを優れたパフォーマンスを示すパラメータによって定義される。なお、ここでの優れたという内容は、反応時間が短いことやペダル踏みこみ速度が高いことといった衝突を回避するためにより効果を発揮する方向で表現されたものを指す。

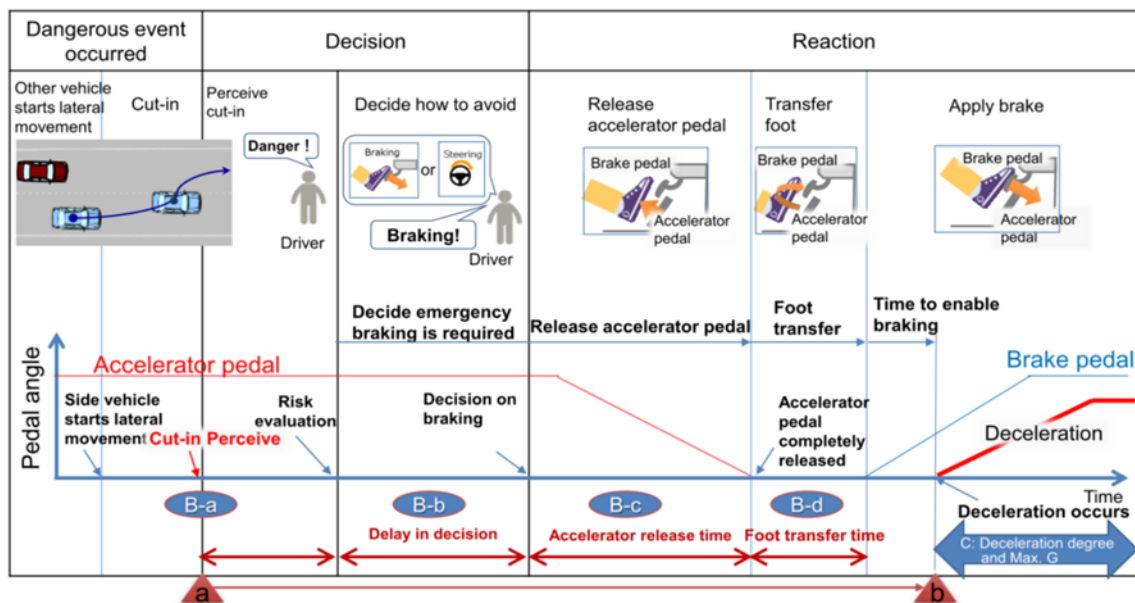


図 93 ドライバのブレーキによる衝突リスク回避のプロセス(他車がカットインするシナリオのケース)

6.2. C&C Driver のパフォーマンスの定義方法

6.2.1. 自動運転車が Responder となる場合のパフォーマンス

前述したように、Responder の役割となる自動運転の主たる回避行動がブレーキ操作であると考え、交通外乱の種類(自車周辺の交通参加者の位置や動作)に関わらず、C&C Driver のブレーキ操作のパフォーマンスを定義することで防止可能性を判定する。防止可能性を判定するためには、それぞれの運転行動要素を定量化する必要がある。ただし、あらゆる運転行動要素をシナリオに合わせて全て定量化することは現実的ではない。このとき、シナリオを適切に評価するためには、ドライバーのパフォーマンスを定める汎用的な要素と特化的な要素に分類して定量化する方法を採ることが効果的といえる。汎用的な要素の例として、C&C Driver が危険を認知してから物理的な減速制動力が発生するまでの遅れ時間、ブレーキ操作してから最大減速度に要する時間、最大減速度等が挙げられる。一方、特化的な要素の例として、隣接する車線を走行している車両の左右方向の動きがレーンキープのためのものか、あるいは、レーンチェンジのためのものかを判断する時間等が挙げられる。

C&C Driver の危険認知から減速制動力が発生するまでの遅れ時間は 0.75sec であるとした。これは、日本国内において警察庁や交通事故の裁判で扱われている「危険を判断してからブレーキを踏み始めるまでの遅れ時間」※を適用した。

※NOTE: 警察関連 <https://www.pref.niigata.lg.jp/uploaded/attachment/325068.pdf>

WHO/GRSP, *Speed management: a road safety manual for decision-makers and practitioners*, 2008
では 1 秒

最大減速度については、図 94 に示す日本国内の実験データを引用して 0.774G とした(牧下ら, 2001)。この実験においては、67 名の一般運転者と 183 名の安全運転技能のトレーニングを受けた一般運転者に緊急事態を想定したブレーキ操作データを実車試験により取得した。一般運転者が緊急時に発生させうる制動力が 0.689G であったのに対し、一般運転者の中でも安全運転技能のトレーニングを受けたドライバーは 0.774G の制動力であった。したがって、安全運転技能のトレーニングを受けた一般運転者の高水準の技能を示す値を有能で注意深い状態を定義するために採用した。

また、NHTSA(2007)が実施した交通事故時のドライバーの最大限速度を調査したデータ(図 94)も 0.74G が最頻値として報告されており、Competent and careful human driver モデルに適用した最大減速度 0.774G は妥当な値であると言える。

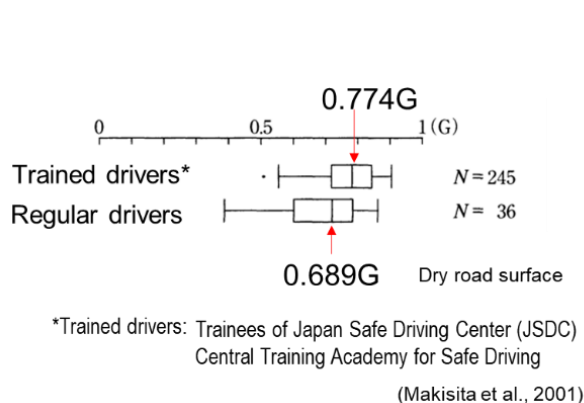


図 94. 緊急ブレーキ特性の研究例(最大減速度)

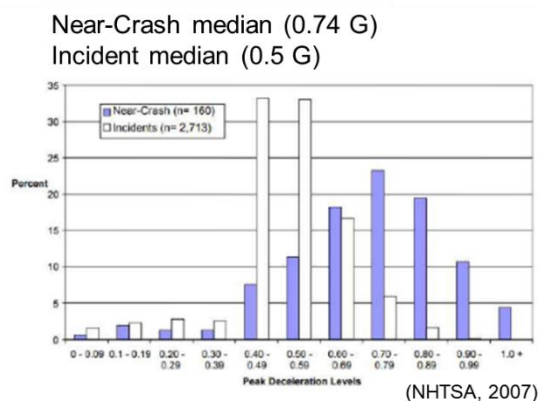


図 95. 先行車の減速による最大減速度

図 96 は運転技能のトレーニングを受けたドライバーによる減速ブレーキ操作時の減速度の波形である。前述と同様に日本国内の実験データを引用している。この波形図は、ブレーキ開始してから最大減速度に到達するまでの時間や減速度を一定に維持する過程を示しており、Competent and careful human driver の最大減速度到達までに要する時間が 0.6sec で収束する特徴に基づいて定義した。

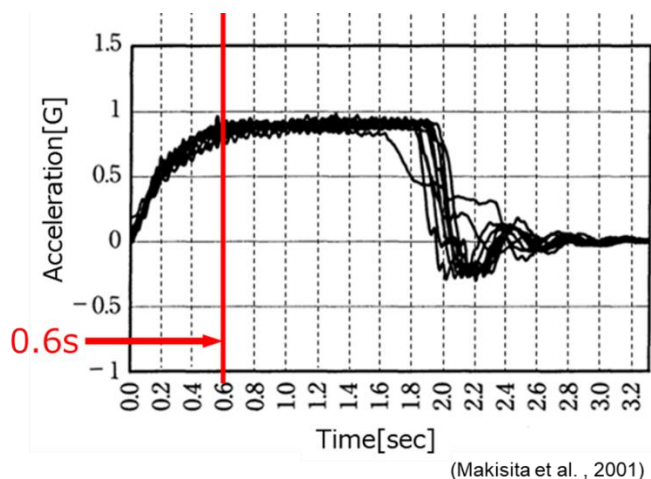


図 96. 緊急ブレーキ特性の研究例(最大減速度までの到達時間)

C&C Driver のブレーキ操作を表す運転行動要素を図 97 に示す。図 98 は、C&C Driver のブレーキ制動力モデルを示しており、左側のモデルはドライバによるブレーキ操作による制動力が発生する過程を示すモデルである。右側のモデルは衝突被害軽減ブレーキ装置(AEB: Advanced Emergency Braking)の機能モデルであり、AEB 搭載による回避性能向上分を考慮している。これら 2 つのモデルを統合することで、有能で注意深いドライバが自らの判断で実行するブレーキ操作に先進的な安全システムである AEB によるブレーキ操作のアシストが追加されるブレーキ制動力モデルを定義できる。

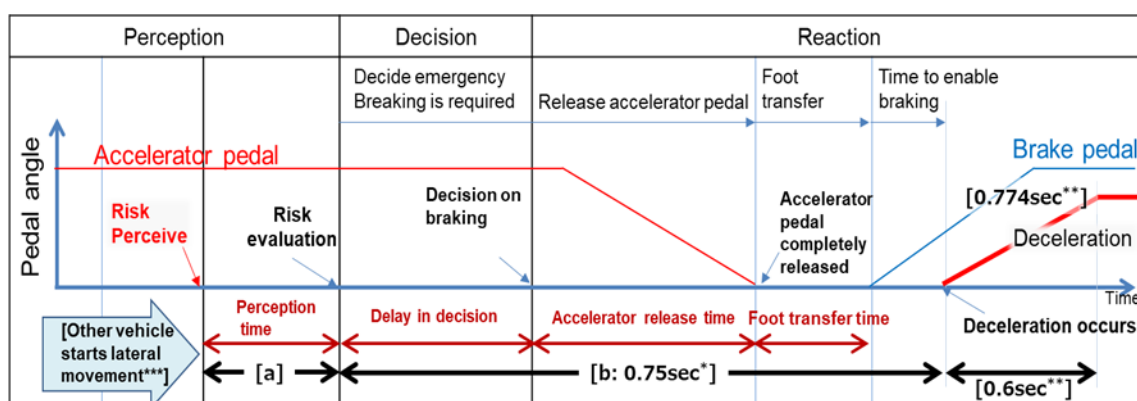


図 97 Competent and careful human driver model のブレーキ操作の流れ

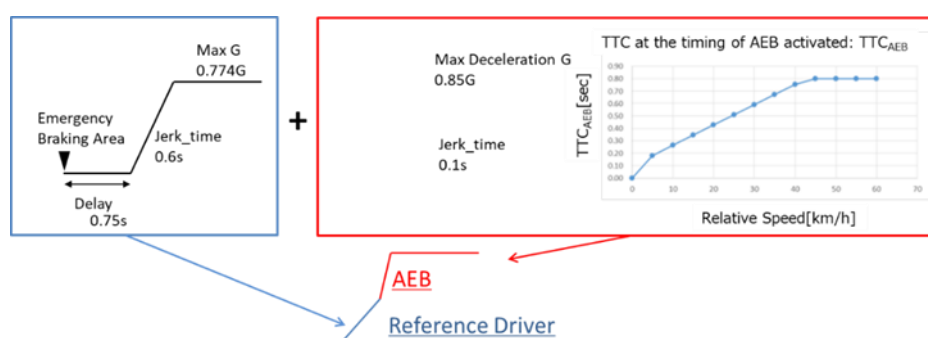


図 98 Competent and careful human driver のブレーキ制動力モデル

6.2.2. 自動運転車が Initiator となる場合のパフォーマンス

自動運転車が Initiator の役割を担う場合、レーンチェンジや旋回などのふるまいを通じて自車が他車の進路上に進入する。したがって、他車の進路上に進入する自車には衝突を回避することだけでなく、その進行を妨害することも回避することが求められる。

道路における危険の防止とその他交通の安全と円滑を図ることなどを目的とする道路交通法の第 1 章総則第 2 条 22 項において、「進行妨害とは車両等が、進行を継続し、又は始めた場合においては危険を防止するため他の車両等がその速度又は方向を急に変更しなければならないこととなるおそれがあるときに、その進行を継続し、又は始めることをいう。」と定められている。道路交通法における進行妨害を回避するためには、他の車両等がその速度又は方向を急に変更しなければならないことを安全要件として明確にする必要がある。

他の車両にとっての進行妨害はシナリオによって異なると考えられ、図 99 が示すように自車がレーンチェンジをするケースでは、自車のレーンチェンジが完了した時点で後続車のドライバーが妨害されたと感じない余裕を確保することが期待される。図 100 が示すように自車が右折をするケースでは、自車の右折によって交差エリアを車両後端が通過してから対向車の先端が到達するまでに対向車のドライバーが妨害されたと感じない余裕を確保することが期待される。

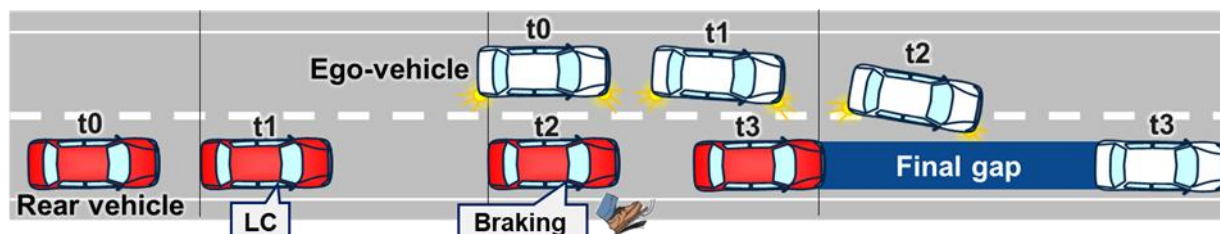


図 99 他者の進行妨害を考慮する場合の考え方(自車がレーンチェンジをするケース)

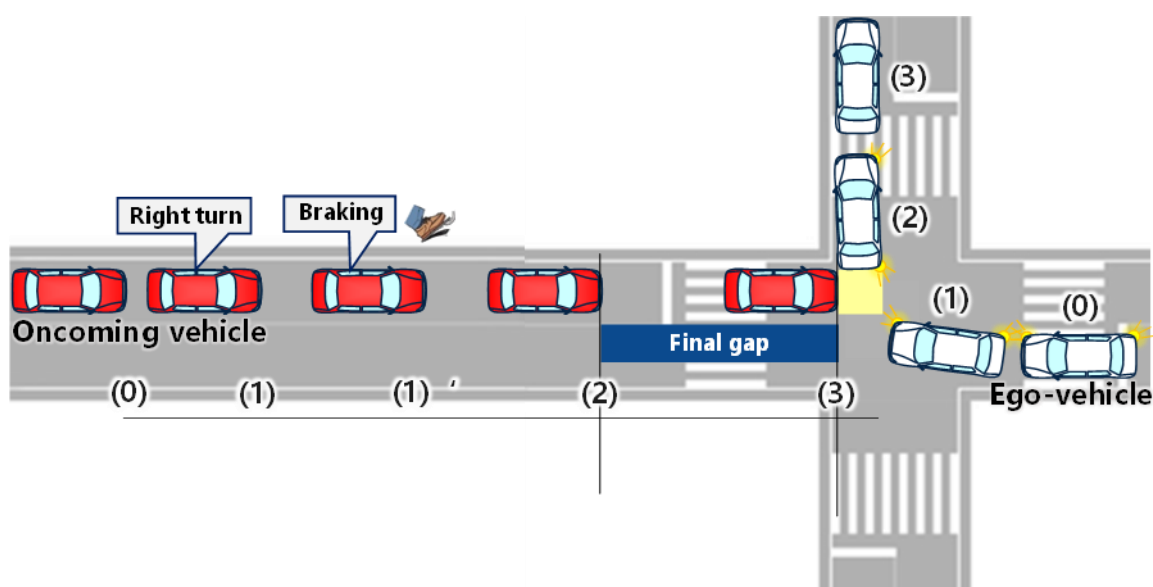


図 100 他者の進行妨害を考慮する場合の考え方(自車が右折をするケース)

(出典: Kitajima et al., 2025, *Defining Preventable Boundaries in Automated Driving Systems: A Driver Behavior Model for Scenario-Based Assessments*)

6.3. Responder の安全要件を検証する C&C Driver の具体例

6.3.1. カットイン シナリオ

カットインシナリオは、自車の隣接車線を走行している車両が自車前方に合流(カットイン)するシナリオである。図 101 は自車前方にカットインする際に C&C Driver が危険と判断するまでの境界条件を表した模式図である。この危険と判断するまでに必要な時間が本シナリオの特化型の要素であるため、ドライビングシミュレータ等を用いた実験を通じて調査する必要がある。

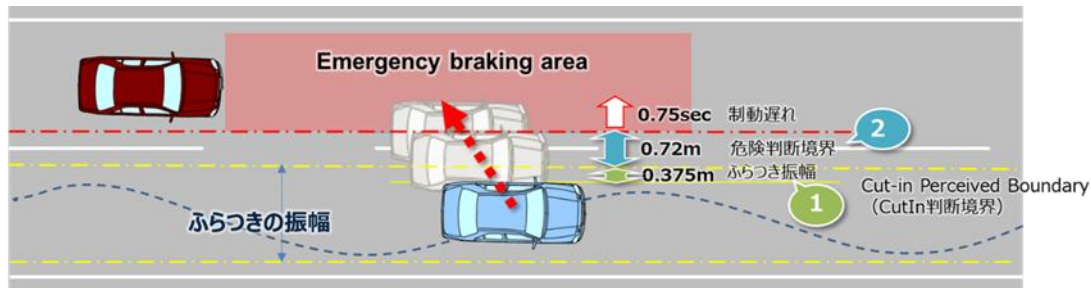


図 101 カットイン判断条件と危険判断境界

自車が隣接車線走行中の車両にカットインされると判断する境界条件を、カットイン車両の横移動距離（ふらつき振幅）で定義する。実交通環境において、車線維持して走行している車両は少なからず左右にふらつきながら走行している。このふらつきの横移動距離の範囲においては、自車の隣接車線を走行している車両がカットインすると判断することは考えにくい。

そこで、実交通環境を観測したデータからレーンキープしている車両の横移動距離（ふらつき振幅）の分布（図 102）から、カットインの判断の境界条件を定義した。実交通環境におけるレーンキープ周辺車両の車線内のふらつき振幅の 50%ile 値は 0.75m であることから、片側の振幅としては 0.375m とみなすことができる。他車が 0.375m を超えない範囲の左右方向の移動はレーンキープ、0.375m を超える連続的な移動はカットインであるとドライバは判断する。

ドライバが他車のカットインを判断した後、自車にとって危険と認知して緊急ブレーキ操作を判断する境界条件（危険判断境界）については、実交通観測データから導出した最大横速度と危険と判断するまでの時間を乗算することで定義可能である。

図 102 は、実交通観測データを分析した他車カットイン時の横速度の最大値の分布を示している。得られた分布に基づいて他車カットイン時の最大横速度を 1.8m/s と定めた。

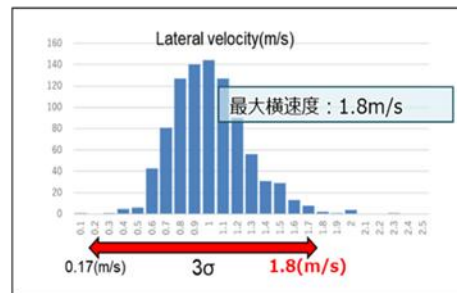
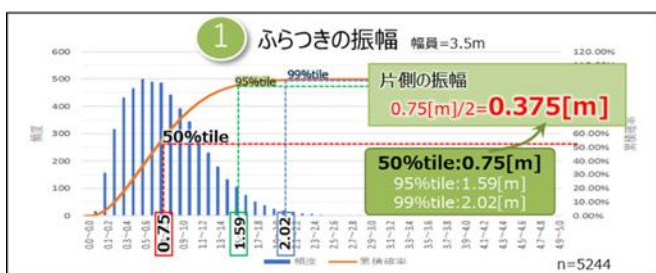


図 102 「ふらつきの振幅」の実観測データ統計値 図 103 「最大横速度」の実観測データ統計値

「危険と判断するまでの時間」の導出にあたり、日本国内で実施された、ドライビングシミュレータを用いた実験データを活用し分析を行った。実験の前提条件を図 104 に示す。



設定項目	数値
車線の幅員	3.5 m
自車目標速度 V_e	100 km/h
前方並走車群走行速度 V_o	70 km/h
カットイン車両最大横速度 V_{oL}	1.8 m/s
カットイン開始時TTC値	3.0s

図 104 ドライビングシミュレータ実験の前提条件

実験は一般ドライバ 20 名(表 34)に対し、他車カットインによるドライバ対応(反応時間、回避操作)を計測。1 人あたり 2 回計測を行い、1 回目と 2 回目のそれぞれの平均値を比較することで危険と判断するまでの時間を導出する。

表 34 実験参加者の属性

属性	人数	特性	構成
熟練ドライバ (Expert)	11名	免許取得後5年以上で日常的に運転しており月に1度以上の頻度で高速道路を走行する	・男性6名 女性5名 ・平均年齢 38.7歳
非熟練ドライバ (Beginner)	9名	免許取得後5年未満で日常的に運転しており年に1度以下の頻度で高速道路を走行する	・男性6名 女性3名 ・平均年齢 23.1歳

実験結果を(図 105)に示す。他車カットイン開始から危険と判断するまでの時間は、初回の判断では約 0.8sec、2 回目以降は約 0.4sec との結果が得られた。これら実験結果から、初回の判断では他車のカットインを見極める時間と危険と判断する時間を要していると考えられ、2 回目はカットインに対して注意して走行しているため、他車カットインを見極める時間が不要となる。一方で、ドライバが注意していても危険判断に要する時間は必要であり(図 105)、「危険と判断するまでの時間」を 0.4sec と定義した。

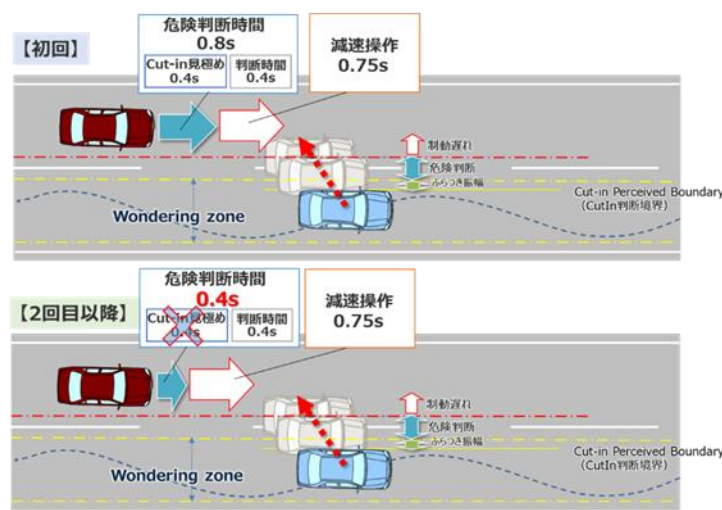
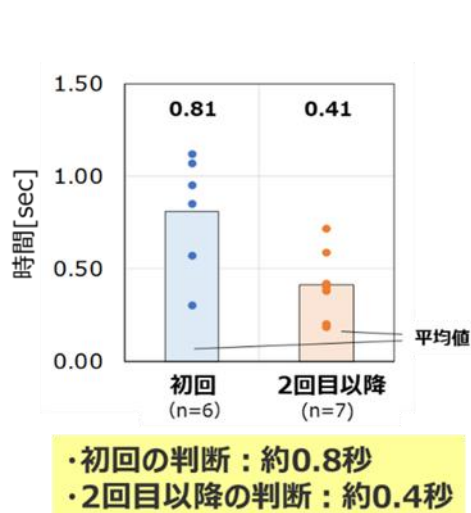


図 105 ドライビングシミュレータ実験結果 図 106 カットイン見極め時間と危険判断時間の関係

前述の通り、危険判断境界は最大横速度と危険と判断するまでの時間の乗算で定義される。実交通観測データから導出した最大横速度 1.8m/s と、ドライビングシミュレータ実験結果から導出した危険と判断するまでの時間 0.4sec を乗算し、 $1.8 \times 0.4 = 0.72\text{m}$ を危険判断境界と定義した。

カットインの判断条件と危険判断境界を図 97 のダイアグラムにあてはめると図 107 となる。

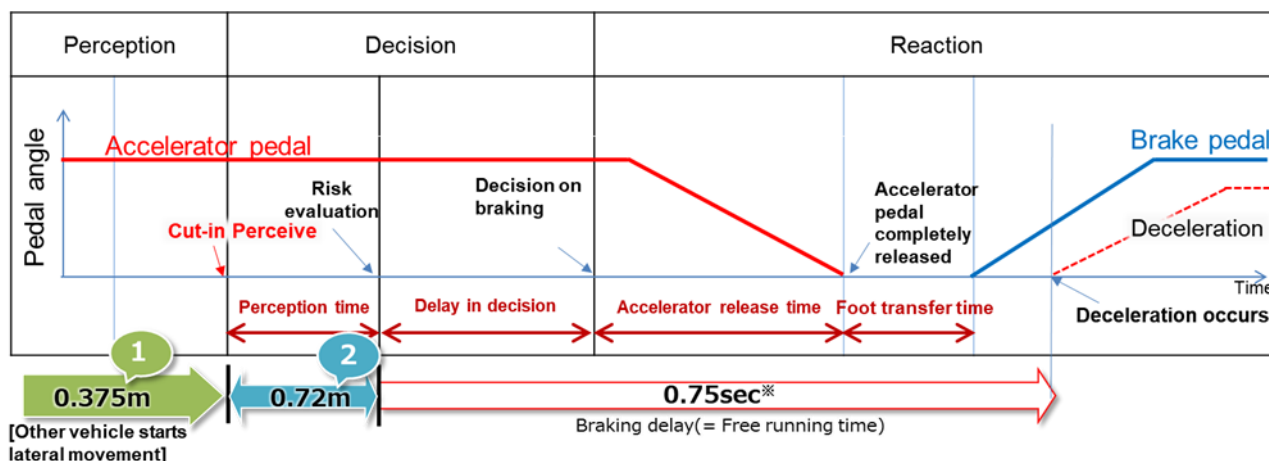


図 107 Competent and careful human driver model (Cut In)

縦方向（相手車両との車間距離）の危険判断境界については、UNR 衝突警報ガイドラインによると、緊急動作の求められる境界は TTC(Time to Collision: 衝突余裕時間)=2.0sec と定義されている（図 108）。これを引用し、縦方向の危険判断境界を TTC=2.0sec と定義した。

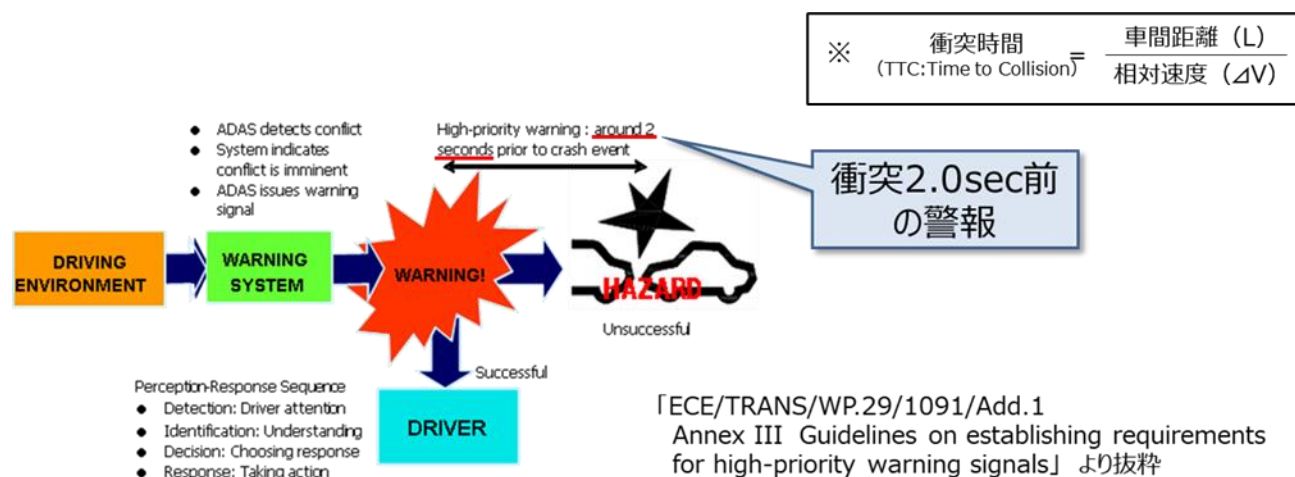


図 108 UNR 衝突警報ガイドライン(引用)

6.3.2. カットアウトシナリオ

カットアウトシナリオは、自車が追従する先行車両が突然隣接車線へレーンチェンジ(カットアウト)するシナリオである。これは先行車両のカットアウトで自車前方に突如出現する低速走行車や停止車両(故障、渋滞末尾など)に対して安全性を確認するためのシナリオである。図 109 は先行車両がカットアウトする際に Competent and careful human driver が危険と判断するまでの境界条件を表した模式図である。

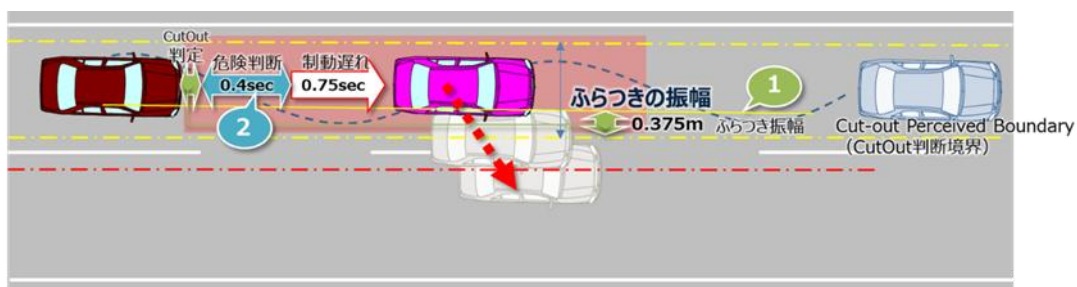


図 109 カットアウト判断条件と危険判断境界

先行車両がカットアウトすると判断する境界条件は、前述したカットイン判断条件と同様に、先行車両の横移動距離（ふらつき振幅）で定義する。カットインもカットアウトも車線変更動作であり、カットアウトの判断条件も、カットインと同様に実交通観測データのふらつき振幅の分布を用いた境界条件を適用する（図 102）。

また、カットアウト判定の後、その先に出現する先々行車を認識し危険と判断するまでの時間は、実験データに基づき 0.4sec と定義した（図 105、図 105）。

カットアウトの判断条件と危険判断の条件を図 97 のダイアグラムにあてはめると図 110 となる。

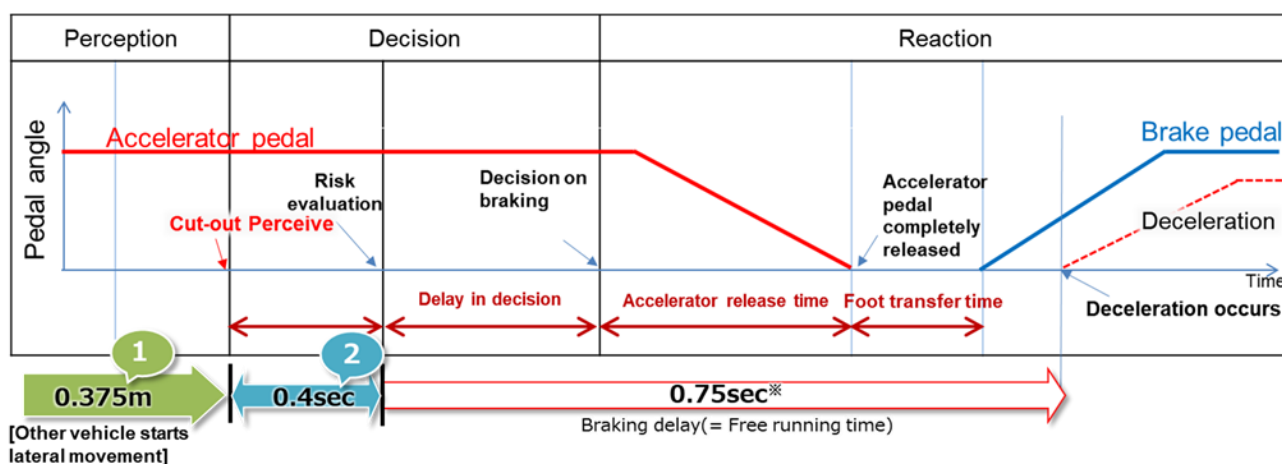


図 110 Competent and careful human driver model (Cut Out)

6.3.3. 減速シナリオ

減速シナリオは、自車が追従する先行車両が突然急減速することを想定したシナリオである（図 111）。前述したカットイン、カットアウトシナリオでは、先行車または隣接車両のレーンチェンジ判断に要する条件が必要であったが、減速シナリオにおいては縦方向の挙動のみであるため、先行車減速を危険と判断するまでの時間のみを定義すれば良い。危険判断に要する時間は前述と同様に 0.4sec が適用可能である。

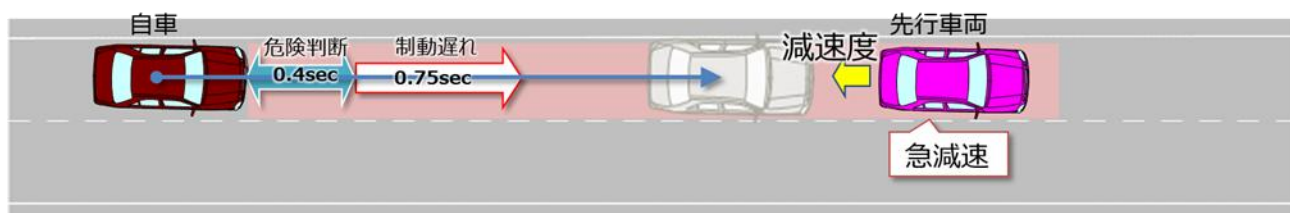


図 111 減速シナリオにおける危険判断境界

減速シナリオにおける危険判断の条件を図 97 のダイアグラムにあてはめると図 112 となる。

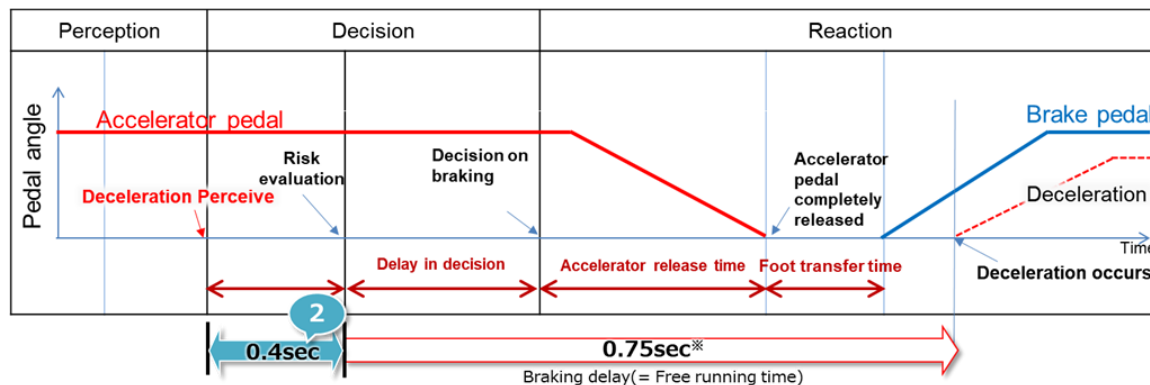


図 112 Competent and careful human driver model (Deceleration)

6.3.4. 基準導出のためのパラメータ定義

交通外乱に関する安全基準の導出において必要となるパラメータを表 35 に示す。交通外乱に関する評価シナリオは、道路形状、自車動作、周辺交通参加者の位置と動作の定義(パラメータ項目)によって生成される。評価シナリオで必要なパラメータ項目を具体的な数値範囲で定義し、その範囲において Pass/Fail 境界を導出する。

表 35 交通外乱パラメータ項目一覧

Operating conditions	Roadway	#of lanes = The number of parallel and adjacent lanes in the same direction of travel Lane Width = The width of each lane
Initial condition	Initial velocity	Ve0 = Ego vehicle
		Vo0 = Leading vehicle in lane or in adjacent lane
		Vf0 = Vehicle in front of leading vehicle in lane
	Initial distance	dx0 = Distance in Longitudinal direction between the front end of the ego vehicle and the rear end of the leading vehicle in ego vehicle's lane or in adjacent lane
		dy0 = Inside Lateral distance between outside edge line of ego vehicle in parallel to the vehicle's median longitudinal plane within lanes and outside edge line of leading vehicle in parallel to the vehicle's median longitudinal plane in adjacent lines.
		dy0_f = Inside Lateral distance between outside edge line of leading vehicle in parallel to the vehicle's median longitudinal plane within lanes and outside edge line of vehicle in front of the leading vehicle in parallel to the vehicle's median longitudinal plane in adjacent lines.
		dx0_f = Distance in longitudinal direction between front end of leading vehicle and rear end of vehicle in front of leading vehicle
		dfy = Width of vehicle in front of leading vehicle
		doy = Width of leading vehicle
		dox = Length of the leading vehicle
Vehicle motion	Lateral motion	Vy = Leading vehicle lateral velocity
	Deceleration	Gx_max = Maximum deceleration of the leading vehicle in G dG/dt = Deceleration rate (Jerk) of the leading vehicle

6.4. C&C Driver を用いた防止可能性の境界の算出

本節では、定義した C&C Driver を用いてシナリオごとの防止可能な境界を算出することについて述べる。前述した通り、具体的な防止可能な境界は、C&C Driver モデルを用いた数値計算で導出が可能である。境界導出のためのパラメータ範囲は、自動運転システムの許容される最大車速範囲内で、すべてのパラメータの組合せが対象となるように設定する。

6.4.1. カットインシナリオの防止可能な境界の導出結果

カットインの安全基準は、自車速と相手車両との相対速度ごとに安全基準が導出される。図 114 の緑のエリアで示されるパラメータ範囲においてはカットイン車両との衝突は許容されない。

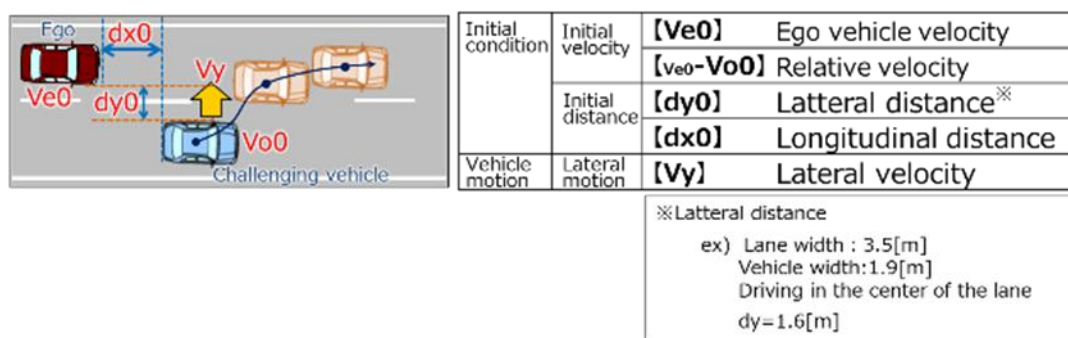


図 113 カットインシナリオのパラメータ概念図

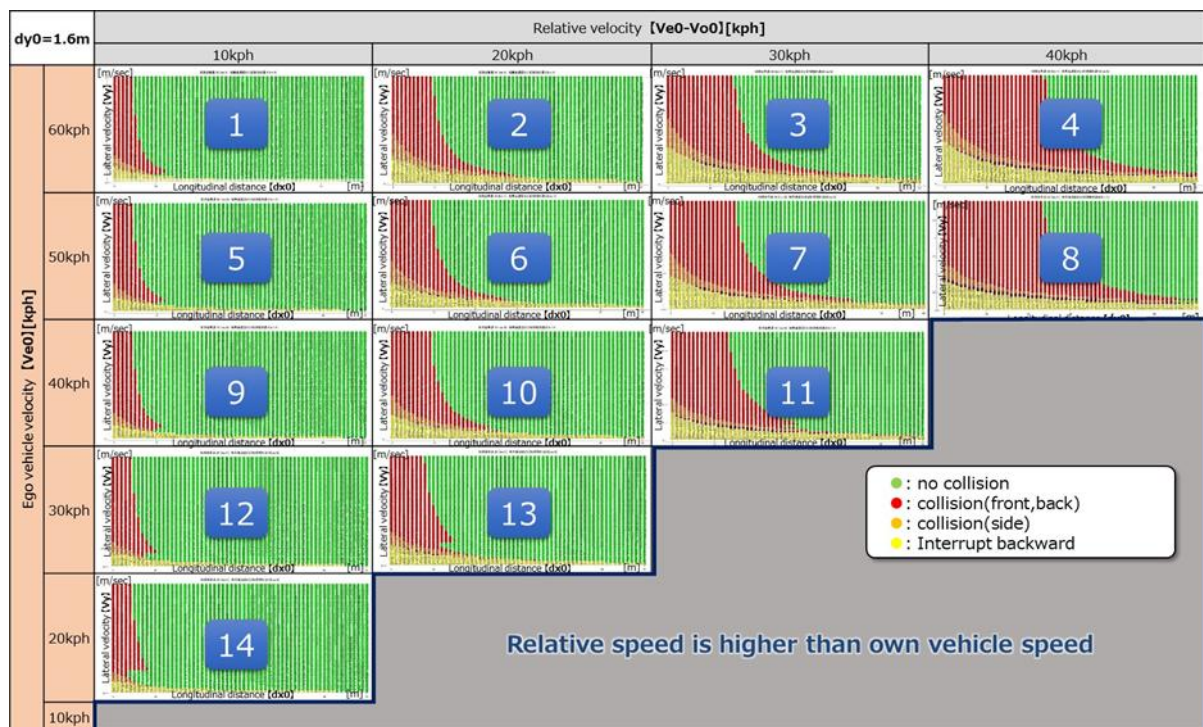


図 114 カットインシナリオの防止可能な境界の導出結果

6.4.2. カットアウトシナリオの防止可能な境界の導出結果

カットアウトの安全基準は、先行車がカットアウトした先に存在する全ての減速(停止)車に対して、衝突回避可能であることが要求される。この基準導出にあたっては、前述した Competent and careful human driver モデルで先行車を THW=2.0sec で追従走行させて基準導出している。THW=2.0sec は各国の法令および指導内容を参照して適用した値である(参: *Express Highway Research Foundation of Japan, 2015*)。

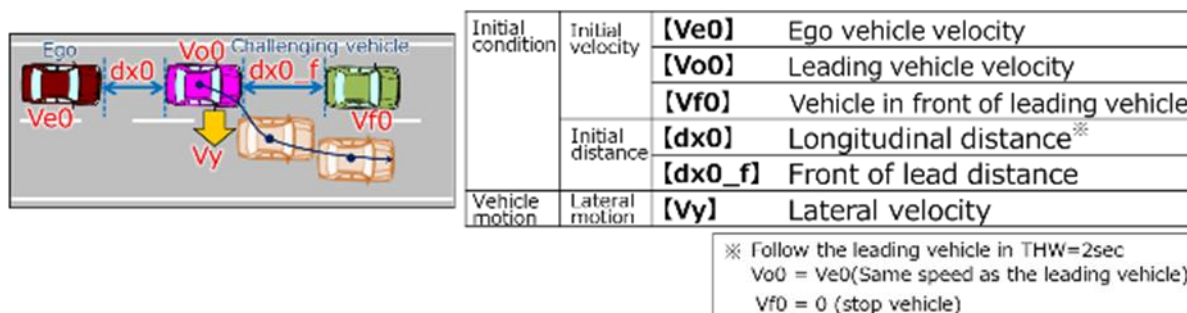


図 115 カットアウトシナリオのパラメータ概念図

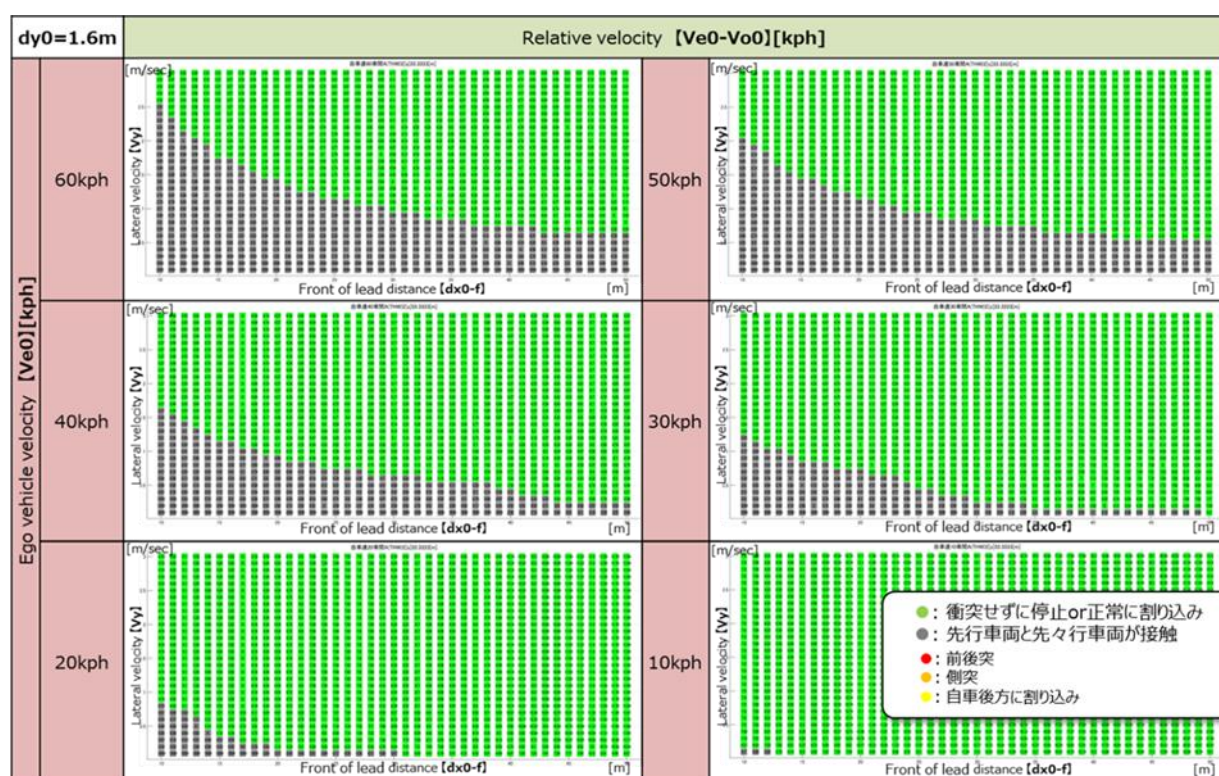


図 116 カットアウトシナリオの防止可能な境界の導出結果

6.4.3. 減速 シナリオの防止可能な境界の導出結果

減速シナリオの安全基準は、前方車両の-1.0G 以下の急減速、もしくは停止車両に対して衝突回避可能であることが要求される。この基準導出にあたっては、前述した Competent and careful human driver モデル

で先行車を THW=2.0sec で追従走行させて基準導出している。THW=2.0sec は各国の法令および指導内容を参照して適用した値である。

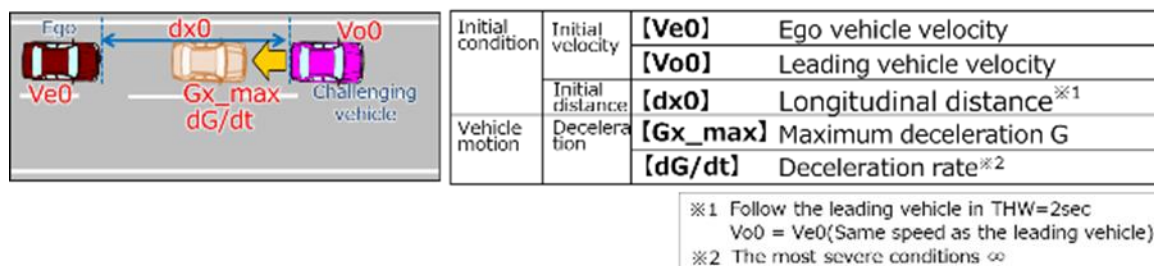


図 117 減速シナリオのパラメータ概念図

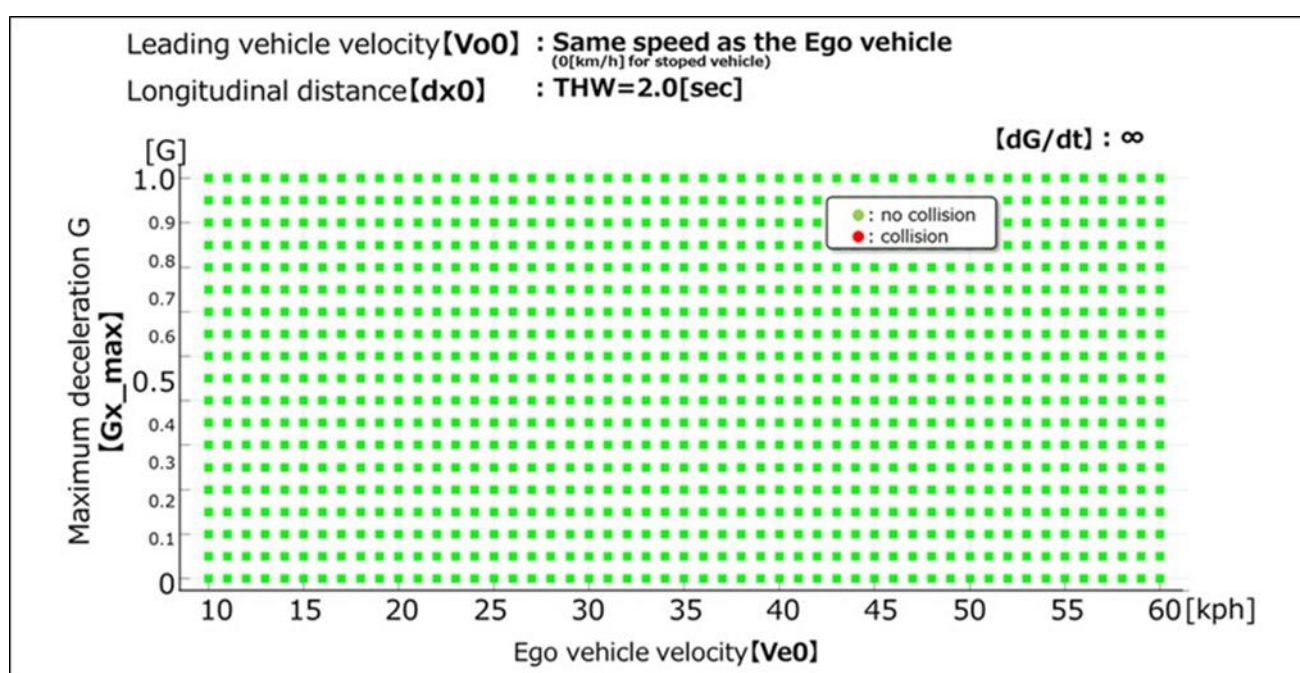


図 118 減速シナリオの防止可能な境界の導出結果

NOTE: 図 118 では 60km/h 以下の条件であるため Preventable Boundary が現れない結果となる。

委員表

分科会長 佐藤 秀亮 トヨタ自動車(株)

副分科会長兼評価シナリオ WG リーダー 小澤 浩一郎 本田技研工業(株)

副分科会長兼運転行動受容性 WG リーダー 石渡 幸治 日産自動車(株)

委員 大柴 厚之 日野自動車(株)

委員 角田 信次 (株)SUBARU

委員 河野 真一郎 いすゞ自動車(株)

委員 休坂 慎也 マツダ(株)

委員 久保田 悠美 日産自動車(株)

委員 竹腰 史彦 スズキ(株)

委員 古川 康弘 三菱自動車工業(株)

委員 八代 勝也 UD大型車両ス(株)

委員 山田 憲一 ダイハツ工業(株)

アドバイザー 安部 原也 (一財)日本自動車研究所

アドバイザー アルザメリ フサム (一財)日本自動車研究所

アドバイザー 遠藤 駿 (一財)日本自動車研究所

アドバイザー 北島 創 (一財)日本自動車研究所

アドバイザー 中村 弘毅 (一財)日本自動車研究所

アドバイザー 村田 智良 (一財)日本自動車研究所

Annex A 道路形状

道路構造から抽出した道路構成要素のツリー図と、道路構成要素と関連するパラメータ項目の対応を示す。これらのパラメータ項目定義については表 A-1 に示す。

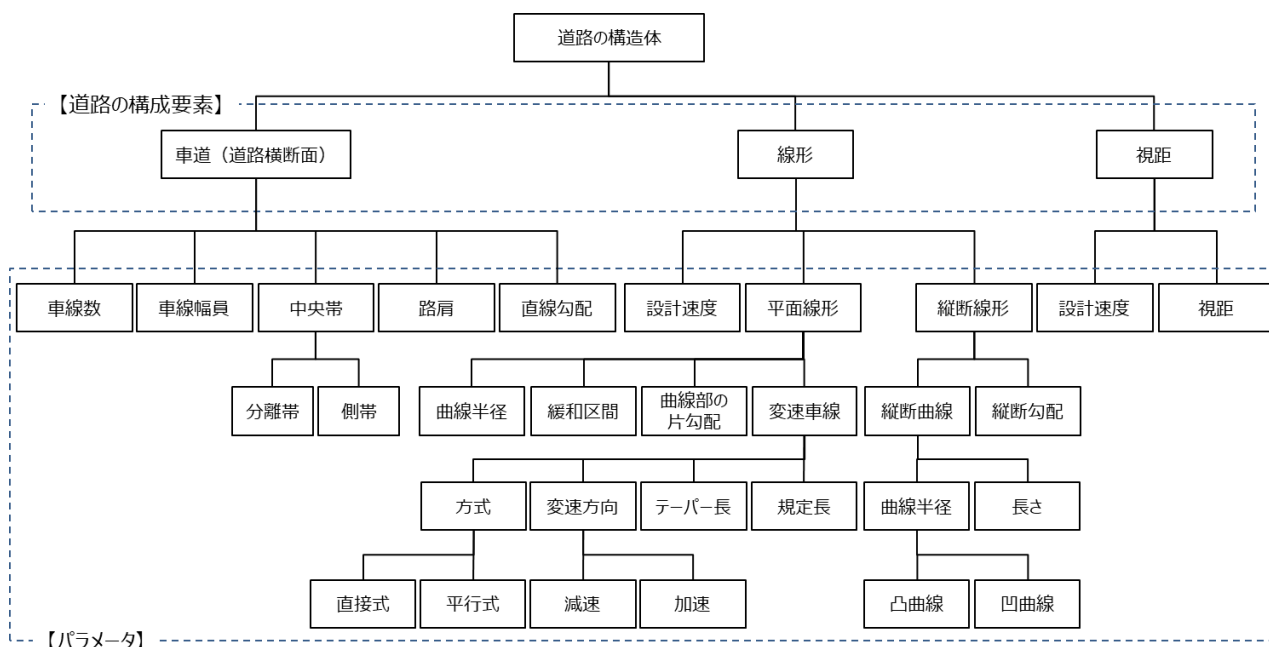


図 A- 1. 道路構造令に基づく道路構成要素(断面、直線、視距離)と関連するパラメータ項目

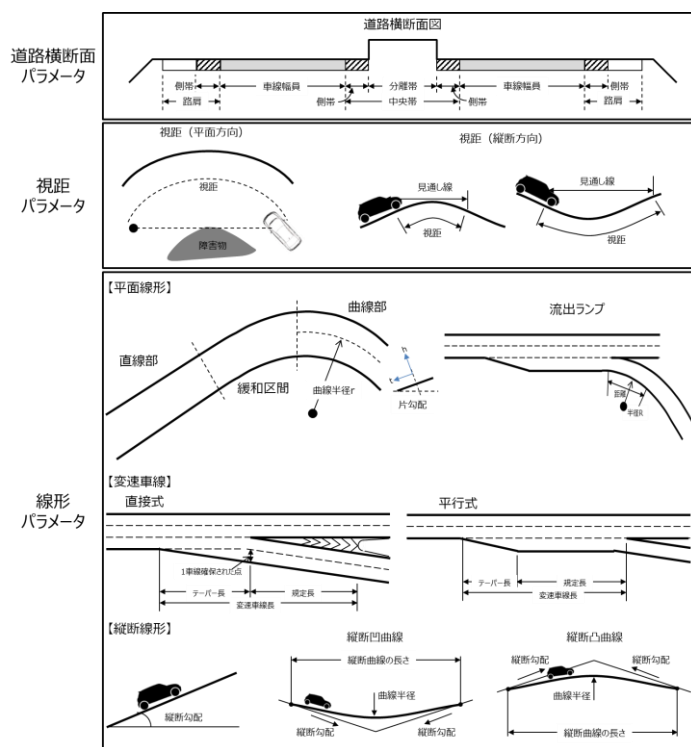


図 A- 2. 日本道路構造令による断面、視距離、直線道路パラメータの例

道路形状パラメータを各シナリオカテゴリ(認識外乱知覚制限、交通外乱、車両運動外乱)に対して検討した。例えば、交通外乱では、周囲車両数の増加に伴い、車線数を増加させるケースがあるが、これは、認識外乱や車両運動外乱に直接関係するものではない。表 A- 1 は、シナリオカテゴリ毎によるシナリオ開発のための道路形状パラメータを示す。

表 A- 1. 車両制御カテゴリによるシナリオ開発のための道路形状パラメータ

道路形状パラメータ			認識限界	交通外乱	車両運動外乱
横断面	車線数		-	合流・分岐路においては周辺車両の増加によりリスクが増加	-
	車線幅員		-	周辺車両との相対距離が短くなる	曲線半径と合わせて車線内維持がより困難
	中央帯	分離帯	分離帯が狭い対向車線で誤認識の恐れ	※分離帯を回避経路に使う可能性はあるがここでは基本扱わず道路形状作成のために表現する	-
	路肩		-	※路肩を回避経路に使う可能性はあるがここでは基本扱わず道路形状作成のために表現する	-
線形	平面線形	曲線半径	曲線半径と障害物によって視距が影響を受ける	-	車線維持が困難
		緩和区間	-	-	短い場合十分な減速が行えず、緩和区間で車両維持が困難
		片勾配	-	-	曲線半径と片勾配の関係によっては車線維持が困難
		変速車線	-	十分な加速/減速を達成するのが困難	-
	縦断線形	縦断曲線	凸曲線トップの障害物による認識遅延	-	アップダウン時の挙動乱れが生じる可能性があるが、縦断勾配で表表される場合がある
		縦断勾配	前方にある物標の誤認識	車両性能によっては交通外乱にも影響を及ぼす	車両性能によっては交通外乱にも影響を及ぼす
視距			視距によって認識遅延	-	-

同様に、各パラメータを考慮した結果、各シナリオで扱われる重要なパラメータは次のようになる:

- 認識外乱シナリオに関連するパラメータは、例えば、中央帯/曲線半径/縦断線形/視距である。
- 交通外乱シナリオに関連するパラメータは、レーン数/幅/速度変更レーン/縦断勾配などである。
- 車両運動外乱シナリオ:幅/曲線半径/非規制区間/片勾配/縦断線形

テストシナリオの道路形状パラメータについては、安全性に影響しないパラメータは固定値とし、安全関連パラメータの範囲のみを定義することにより、必要なテストケース数を減らすことができる。

A.1 道路形状構成要素

走行環境定義に基づき、道路形状は **本線**、**合流車線**、**分岐車線**、**ランプ** に分類される。また、道路形状分類は、**本線**、**速度変更レーン**、**ランプウェイ**、**ノーズ・ビシニシティ(Nose Vicinity)** の 4 要素から構成される(図 A- 3)。

道路構造令における道路構造パラメータは、本書[4]で構成要素ごとに定義されている。この基本分類により、シナリオ作成に使用した 4 つのカテゴリと、日本の道路建設に用いられる標準化された道路形状構成要素との対応関係を確立することができる。標準化された道路形状構成要素の例としては、**主道路**、**速度変更レーン**、**ランプ**、**ノーズ周辺部** が挙げられる。

さらに、道路構造令では、各道路形状構成要素と安全上重要な道路パラメータ(断面、線形、視距離など)との関係についても規定されている。

Note: 本書に記載されている道路形状構成要素及び関連パラメータは、日本の道路建設に関する道路技術基準に従って定義されているが、他の国における基準の大部分は類似の原則を適用しているため、異なる国又は地域に提案されている方法論の適用を容易にしている。

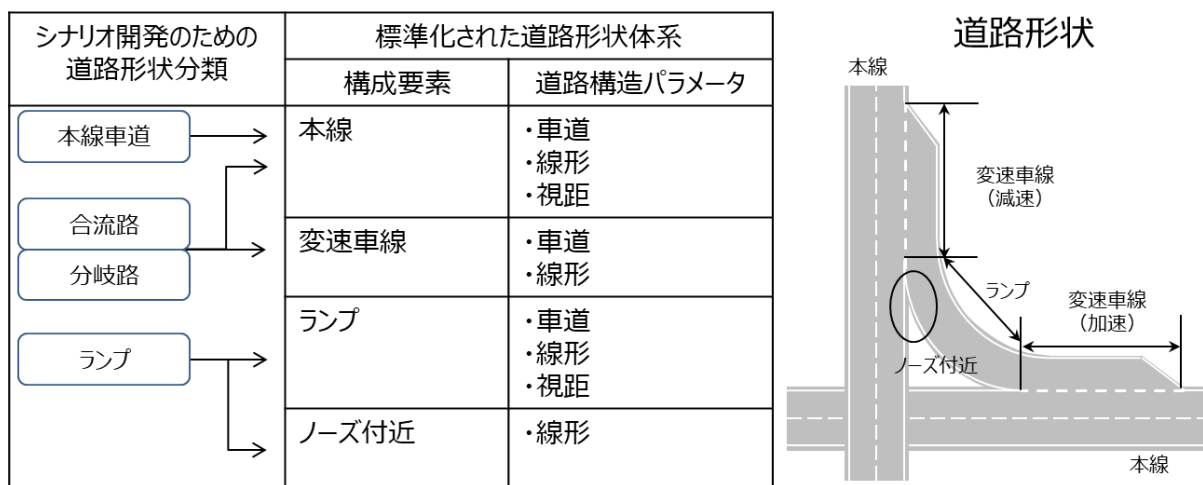


図 A- 3. シナリオ開発のための道路形状分類と標準化された道路構成要素と、対応する安全関連パラメータとの関係

A.2 道路形状基本パラメータ

道路構造モデル(日本の場合:表 A- 2)における基本的な道路形状パラメータを決定するために、重要なパラメータは、各シナリオの厳しい値に設定される(表 A- 2、右から 1 列目)。これらのパラメータは上限値と下限値で示され、シナリオにも依存する。

表 A- 2. 道路構造令(RSO)からの道路パラメータリストと日本の道路構造令からのベースライン道路形状パラメータ

道路形状パラメータ				基準値		最も厳しい値			
横断面	車線数			1, 2, 3, 4		3			
	車線幅員(m)			3.25, 3.5, 3.7		3.25			
	中央帯	分離帯(m)		1.25, 1.5, 2, 2.25, 3, 4.5		1.25			
		側帯 (m)		0.25, 0.5, 0.75		0.25			
	路肩 (m)			1.25, 1.75, 2.5		1.25			
	直線勾配 (%)			2, 2.5		2.5			
線形	設計速度 (km/h)			120, 100		120	100		
	平面線形	曲線部	曲線半径(m)	570, 380		570	380		
			緩和区間(m)	100, 85		100	85		
			片勾配(%)	6, 8, 10		10			
		変速車線	方式	直線式/並行式		直接式	並行式		
			変速方向	加速/減速		減速	加速		
			テーパー長(m)	70, 60		70	60		
			規定長 (m)	210, 110		110	220		
			縦断線形	縦断曲線	凸曲線(m)	11000, 6500		11000	6500
					凹曲線(m)	4000, 3000		4000	3000
	長さ (m)	100, 85			100	85			
	縦断勾配 (%)			5, 6		5	6		
	視距	設計速度 (km/h)			120, 100		120	100	
視距 (m)			210, 160		210	160			

A.3 実環境データによる更新

実際の道路形状は、異なる理由(例えば、地形によって制限される)により、法律に厳密に準拠しない場合がある。これは暫定的な措置として扱われ、長期間にわたって継続される場合がある。このように、道路状況が変化するため、実際の厳しい状況をシナリオに反映させる必要がある。

表 A- 3. 実環境での厳しい状況の例

状況	クリティカルパラメータ	外乱タイプ
複雑な立体交差	本線長が短い距離での分岐/合流（規定長）	交通外乱
ブラインドコーナ	平面線形（曲線半径）が小さい、視距が短い	認識限界 車両運動外乱
中央帯無し	中央帯（分離帯）がない	認識限界
狭いトンネル 合流部の隔壁	路肩が狭い&壁がある（センサ誤認識）	認識限界
逆走防止ポール	規定長が実質短くなる、センサ誤認識	交通外乱 認識限界

A.4 実世界地図データによる道路形状パラメータ更新

このセクションでは、道路形状の重要なパラメータの定義について説明する。各国の道路構造令に基づき、道路形状パラメータを抽出した。ただし、パラメータは重要な要素ではありません。例えば、車線数が多い場合、周囲の車両の数が増加し、これは交通外乱として影響を及ぼす可能性があるが、認識外乱や車両運動外乱には必ずしも影響しない。したがって、道路形状パラメータの選択もシナリオカテゴリに依存する。

- 認識外乱シナリオによってカバーされる重要なパラメータは、分離ゾーン、曲線半径、曲線長さ、縦方向開回路、視距離である。
- 交通外乱シナリオによってカバーされる重要なパラメータは、車線数、車線幅、加減速車線、縦断勾配である。
- 車両運動外乱シナリオでは、対象となる重要なパラメータは、車線幅、カーブ半径、移行部、片勾配、縦断勾配である。

注 1- 参入: テストシナリオの道路形状パラメータとして、影響を受けないパラメータを固定したクリティカルパラメータを設定することにより、テストケース数を削減することができる。

道路形状パラメータを決定するために、表 B2 に従い、日本道路構造令に基づき、道路形状の重要なパラメータに、最も厳しい値を割り当てた。一方で、実際の道路の地形は、様々な理由により、道路構造令を厳格に遵守しない場合がある(例えば、混雑都市の建設空間が限定されているため、合流車線長が道路条例の規定より短くなることがある)。したがって、道路構造令によって定義した道路形状パラメータベースライン値は、実際の厳密な道路形状の条件で更新する必要がある。このために、動的マップデータをプロセスに組み込んだ。例えば、「法定速度 100km/h」および「最小曲線区間半径 100m 未満」(図 A- 4、左)の東京地域における自動車専用道路特性の調査では、多数の場所が該当する(その結果、図 A- 4 の右に青いスポットが生じる)。このような検索は、東京の地域におけるカーブ半径の実際の道路要求パラメータをより良く反映するために、道路幾何学形状のベースラインパラメータ値(表 A- 2)を 380m から 100m 以下に更新する必要があることを示す。

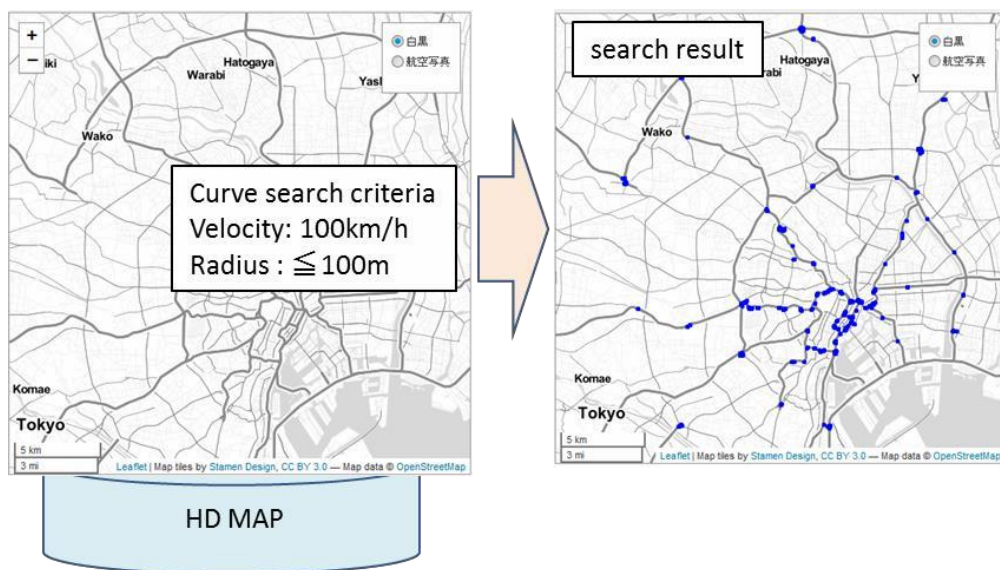


図 A- 4. ダイナミックマップを利用したデータ抽出

Annex B 二輪車特有のシナリオ

交通外乱シナリオについて説明したシステム化プロセスと同様に、道路形状、自車動作、および周囲の二輪車の位置と動作の組み合わせとして、二輪車特有の交通外乱シナリオを体系化する方法論を提案する(図 B- 1)。

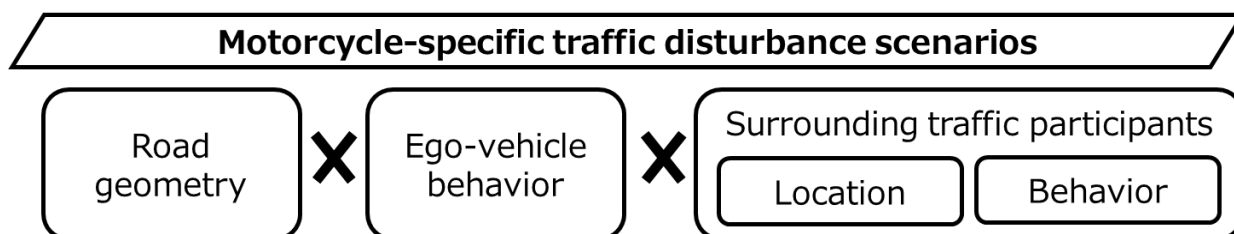


図 B- 1. 二輪車特有の交通外乱シナリオの構造概念図

B.1 周囲の二輪車特有の位置と動作の分類

一般車両におけるシナリオ定義では、周辺車両の位置を自車両の周辺 8 方向と定義した。二輪車シナリオにおいては、これに加え自車両の左右 2 か所を二輪車特有の位置として定義し、シナリオを体系化する。

図 B- 2 の左側に示されるように、二輪車特有の位置[L]および[R]は、自車両の両側に、かつ同じレーン内に配置される。二輪車は、前方位置 1 からの減速(a)、後方位置 2 からの加速(b)、自車両周囲の位置 3、4、5、6、7 または 8 からの車線変更(c)することによって、[L]または[R]の位置に移動することができる(図 B- 2 の中央部)。また、図 B- 2 の右側に示すように、二輪車が[L]と[R]の位置から移動することもでき、自車両に向かい横方向に接近(d)、前方位置への前進(e)、後方位置への後退(f)、自車両と並走(g)が想定される。

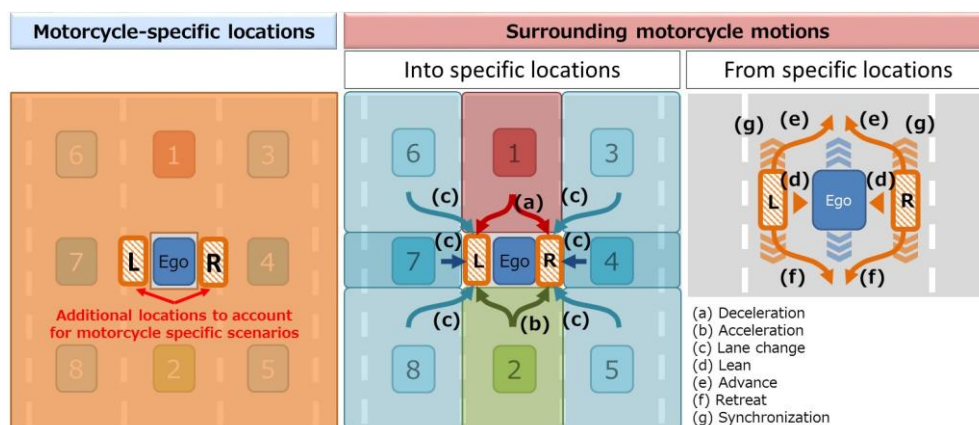


図 B- 2. 自車両(左)の動作を阻害する可能性のある二輪車特有の位置と動作

二輪車も一般車両の交通外乱シナリオ(図 23 参照)と同様に評価すれば良いが、上記に示した二輪車特有の位置を考慮する必要がある。

Annex C 交通外乱の複雑なシナリオへのアプローチ

実際の交通環境では、複数の交通参加者が様々な時に多数の行動を行うことができる。本節では、開発した交通流シナリオの概念に基づいて、複数の交通参加者を含むシナリオを検討する。

C.1 回避行動シナリオの概念

周辺車両が突然危険な動きをする場合には、自車両はそれを回避するために適切な行動をとらなければならない。これらの危険は自車両がレーンキープ中においてもレーンチェンジ中においても発生する。後者は、レーンチェンジ先の周辺車両が、自車両と同じスペースに移動しようとする状況を示す。これらの車両を回避するための動作は、回避行動と呼ばれ、これは、自車両にとって二次的な行動に相当する。このため回避行動シナリオは、自車両によって実行されるこれらの二次的な挙動の安全性を評価することを目的とするシナリオである。

C.2 交通流シナリオ

周辺車両の危険な移動を回避する動作によって生じるシナリオを理解するために、段階的なシーケンスを示す。このシーケンスは、レーンキープしながら走行する自車両への周辺車両の危険な接近、または自車両が車線変更しようとする際の、周辺車両の突然の接近から始まる(図 C-1)。これが自車の回避行動の出発点となる。この回避行動を実行する前に、自車両は回避行動を実行することができる領域を決定する必要がある。この領域を「回避エリア」と呼ぶ。例えば、先行車両が突然減速し、潜在的に危険なシナリオ(回避トリガ)となる場合、自車両は、自車両のすぐ後ろの領域が空(回避エリアがあるか)であるかどうかを判定し、その後、回避行動としての減速をする必要がある。しかし、回避エリアの選択肢を決定する際、自車両は、同じエリアに侵入する可能性のあるカットイン車両を考慮しなければならない。これらの側面、ならびに走行する道路環境(例えば、主要道路、合流レーンなど)を考慮すると、異なる交通流シナリオを生成することができる。

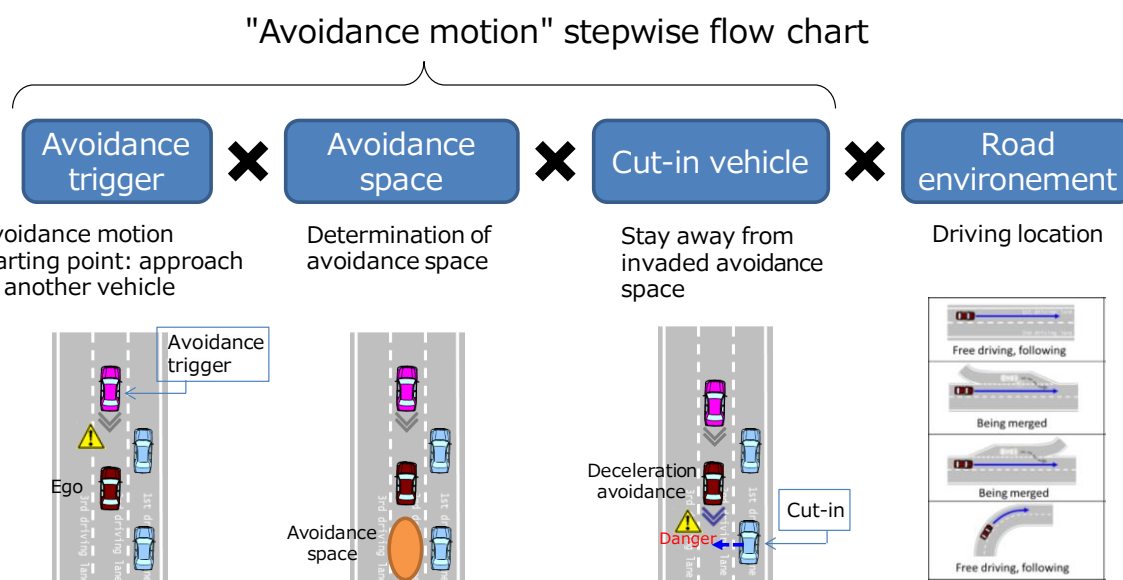


図 C-1. 回避行動の開始から完了までのプロセス

C.2.1 回避トリガ

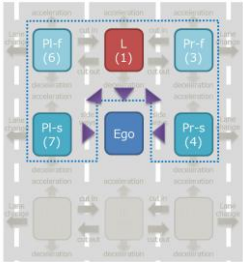
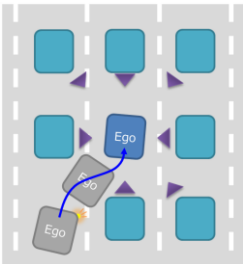
Ego-vehicle motion	Avoidance trigger types	Pattern diagram
Lane keep	<p>a) Approach from the front and sides</p> <p>Deceleration of the lead vehicle, cut-in by the lead side vehicles.</p> <p>※ Approach from the back (rear-end collision) is not considered.</p>	<p>a) Approach from the front and sides</p> 
Lane change	<p>c) Approach to the lane change destination</p> <p>Cut-ins from directions other than that of the ego-vehicle</p> <p>※ Consideration of lane change to the left isn't necessary because of symmetry</p>	<p>b) Approach to the lane change destination</p> 

図 C- 2. 回避行動シナリオにおける自車両の走行シチュエーション

C.2.2 回避領域

回避領域(Avoidance area)は、自車両が回避行動を行うことができる領域として定義される。回避トリガとなる周辺車両の接近が開始されると、自車両は、その回避領域がどこにあるかを判断する必要がある。安全のために、回避領域は誘発車両(Trigger vehicle)が接近してくる方向ではないものとする。図 C- 3 は、レーンキープシナリオとレーンチェンジシナリオの両方の回避領域を強調している。

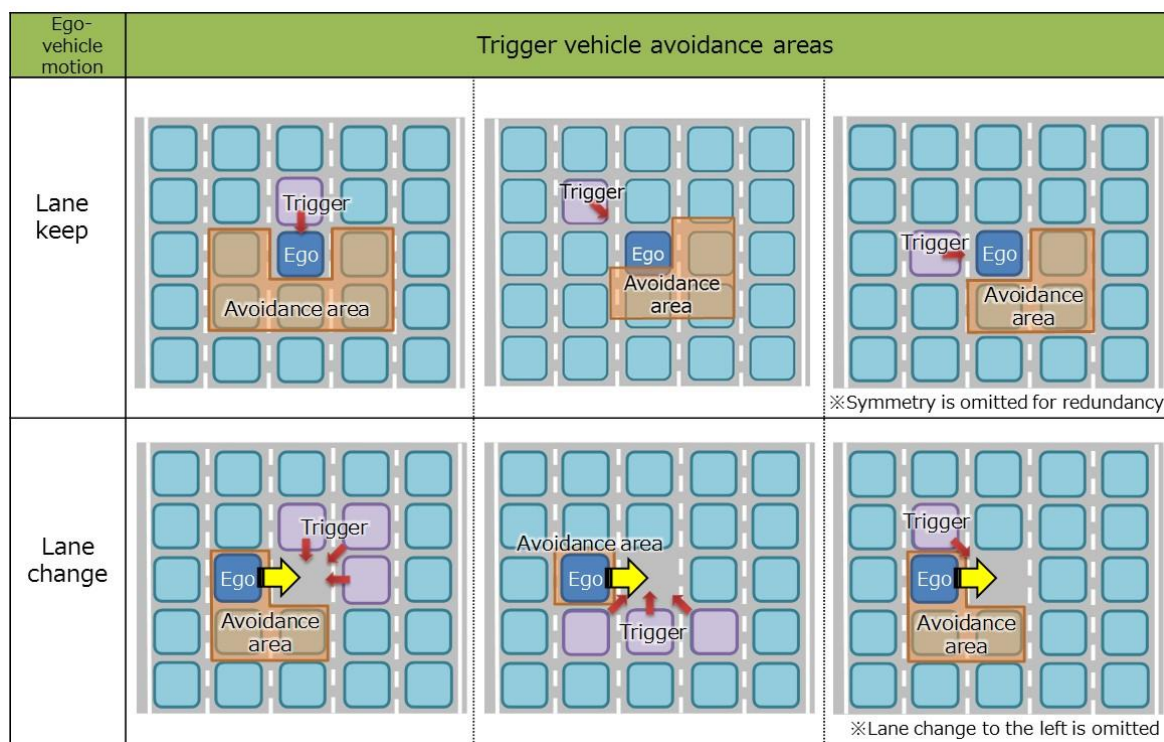


図 C- 3. レーンキープ(上)とレーンチェンジ(下)におけるトリガ車両ごとの回避領域

レーンキープ(図 C- 3 の上半分)の場合、トリガ車両は自車前方位置[L(1)]、自車前方の横位置[PI-f (6)、PI-f (3)]、または自車横位置[PI-s (7)、PI-s (4)]から接近する。図中の橙色で示した部分が回避領域である(左右対称分は省略)。図 C- 3 の下半分は自車がレーンチェンジするシナリオを示している(左右対称分は省略)。この場合、自車のレーンチェンジ先の周囲にいる車両がトリガ車両となり得る。赤で強調表示されたエリアがそれぞれの回避領域となる。

回避領域を決定した後、回避領域内にあらかじめ存在する車両のパターンを決定しなければならない。例えば、先行車の減速がトリガとなった場合、回避領域内の各セルに車両が存在するパターンの組合せは $2^5=32$ 通りとなる(図 C- 4 参照)。

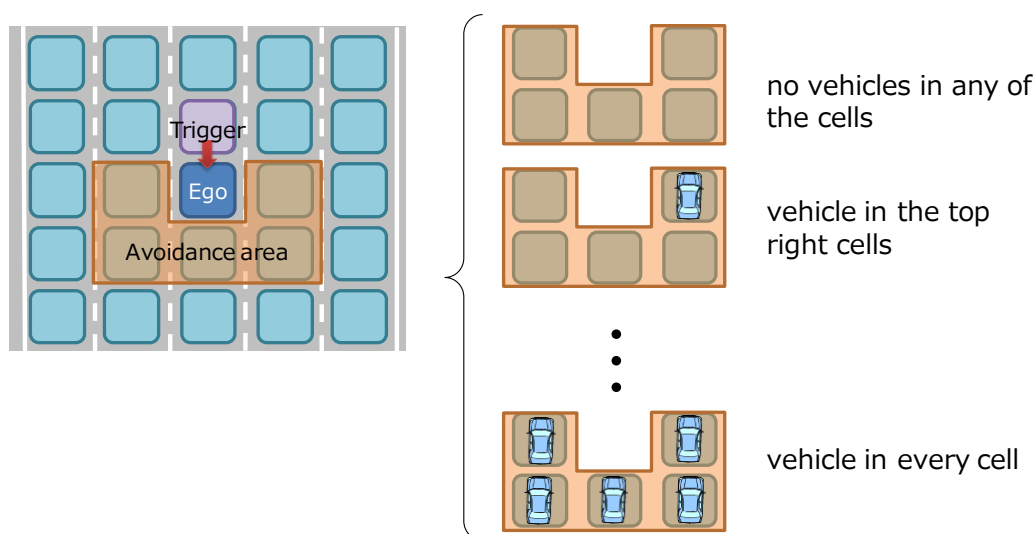


図 C- 4. 回避領域内の各セルに車両が存在するパターン

C.2.3 回避領域へのカットイン車両

回避領域に車両がすでに存在するかどうか(何台、どのセルに存在するか)を確認したら、隣接するスペースから回避領域にカットインする可能性のある車両も特定しなければならない。回避領域へのカットインが可能な範囲を図 C- 5 に示す。

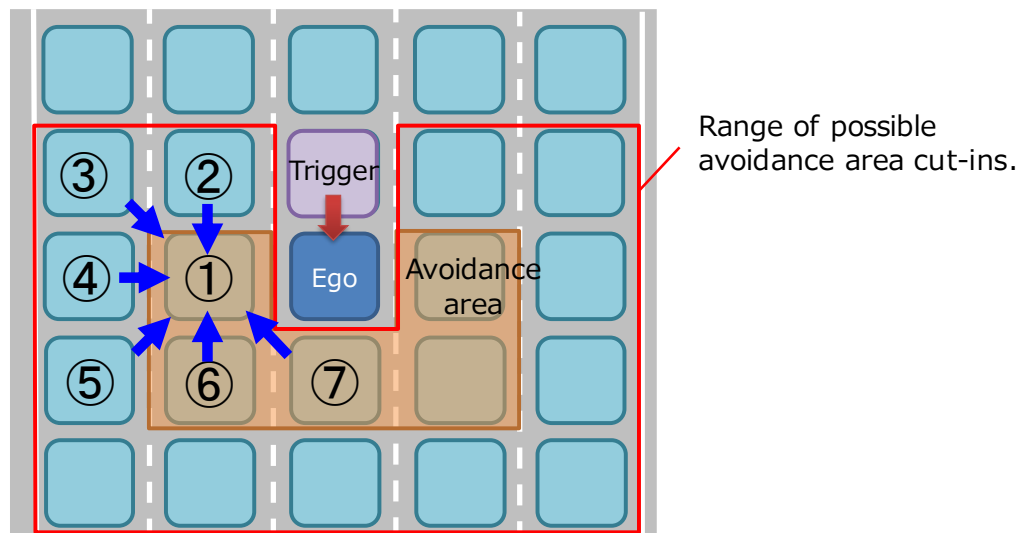


図 C- 5. 回避領域へのカットインが可能な範囲

橙色でハイライトされているのは回避領域である。自車両がセル①内に移動してトリガ車両を回避しようとする場合を考えると、回避領域内の周囲の位置⑥⑦と、それに隣接する位置②③④⑤における車両によるカットインの可能性を考慮する必要がある。

C.2.4 道路環境

道路環境は、道路形状と自車位置との組み合わせであり、回避行動に影響を及ぼす 2 つの要因である。「道路形状」は、主要道路、合流レーン、分岐レーン、ランプの 4 つに分類される。自車の位置は、回避領域の形状と道路形状別の車線数で定義される。

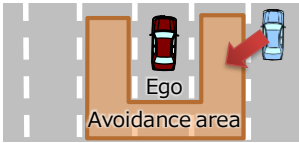





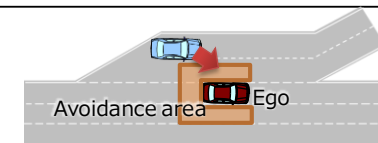
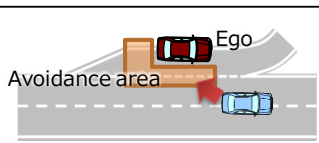
a.Road shape		b.Ego-vehicle position			※走行車線外の有無
Main road	Ego-vehicle position	<div>Adjacent lanes on both sides</div> 	<div>One adjacent lane</div> <div>Left Right</div>  		<div>No adjacent lanes</div> 
	Number of lanes required	Lane 5	Lane 3※		Lane 1※
Merging lane	Ego-vehicle position				
	Number of lanes required	Lane 5	Lane 3※		
Departure lane	Ego-vehicle position				
	Number of lanes required	Lane 5	Lane 3※		
Ramp		Omitted for equivalence with main road (Lane 1, 2※)			

図 C- 6. 回避行動シナリオにおける道路環境の区分

Annex D 事故データに基づく交通流外乱シナリオ体系の網羅性検証

交通流外乱シナリオ体系の網羅性が事故データに基づいてどのように検証されるかを説明するために、3つの例を提供する。

D.1 ドイツ事故調査(German In-Depth Accident Study: GIDAS)データ

交通流シナリオ体系の網羅性は、たとえばドイツの事故研究(GIDAS)データベース(Otte, Krettek, Brunner, & Zwipp, 2003)に報告されている事故事例が当該体系によって適切にカバーされているかを比較することで評価できる。この評価を行う前提として、GIDAS の事故分類体系がドイツの交通環境における予見可能なすべてのシナリオを適切に表現していることが求められる。

GIDAS は、事故特性に関連する事前定義された規則に基づいて交通事故を分類している。GIDAS で定義された事故分類体系(GIDAS コード)と交通流シナリオ体系との対応関係を構築し、両者の比較・検証を行った。

図 D-1 の左上の表は、対応付けの結果として分類された GIDAS 事故コード数を示している。カテゴリ A、B、C は、解析対象データセットに含まれる自動車専用道路に関する 78 種類のコードおよび 7,567 件の事故を表す。これらのデータの比較・検証結果から、33 種類のコード(6,787 件の事故)が交通流シナリオ体系の下で分析可能であることが確認された。これは、交通流シナリオ体系がドイツの自動車専用道路で報告された事故の約 90%をカバーできる可能性を示唆している。

一方、カテゴリ B には、シナリオマトリックスでカバーされていない道路特性に関連する 8 種類のコードと 49 件の事故(全自動車専用道路事故の 0.006%)が含まれている。シナリオ一覧の作成に用いた道路形状データは日本道路構造令(日本道路協会、2004)に基づいているが、この規格はドイツの自動車専用道路が有する一部の特性を十分に反映していない可能性がある。残りの 8 種類のコードを網羅するためには、ドイツ特有の道路特性を考慮したシナリオ体系への拡張が必要であると考えられる。

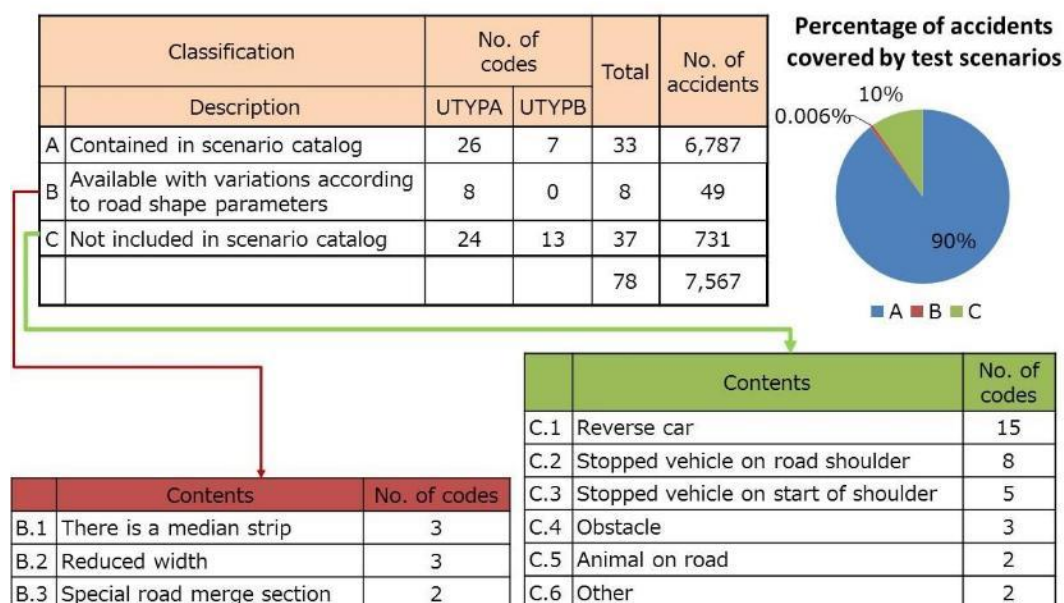


図 D-1. シナリオデータベースと事例数(道路と自走行による)

カテゴリ C には、提案する安全方法論でカバーされていない 37 種類のコードと 731 件の事故(全体の 10%)が含まれる。これらのコードをさらに解析した結果、3 つのサブカテゴリ(合計 28 種類のコード)が、自動車

専用道路における逆走や路肩上での不法駐車など、違法な走行行動に関連するものであることが分かった(C1～C3)。一方、残りの 7 種類のコードは、道路上の障害物や動物の飛び出し、その他の不確定要因(C4～C6)に関係している。

このカテゴリ C に含まれる事故の多くは、通常の自動運転システムによる予防が困難なケースであり、その防止には技術的対応だけでなく、交通規制の強化や運用ルールの改善など、制度的・社会的側面からの補完的アプローチも必要である。

以上より、交通流シナリオ体系は主要な事故シナリオを網羅している一方で、違法行動や不確定要因に起因する事故については、シナリオ設計の拡張および制度的対策の両面から検討が必要であることが明らかとなった。

D.2 クラッシュ回避研究(NHTSA)のためのプリクラッシュシナリオ類型

NHTSA *Pre-Crash Scenario Typology for Crash Avoidance Research* は、NHTSA 一般推定システム (GES) クラッシュデータベースに基づき、クラッシュ回避研究のためのプリクラッシュシナリオ類型を定義したものである(Najm, Smith, & Yanagisawa, 2007)。この類型は、車両の運動およびダイナミクス、ならびに衝突直前に発生する重要な事象を記述するプリクラッシュシナリオで構成されている。

GIDAS データに対して同様の方法論を適用することで、NHTSA のシナリオ類型と本報告書で開発した交通流シナリオ体系のとの比較を行うことが可能となる。この類型は、合計 37 種類のプリクラッシュシナリオカテゴリを含み、そのうちの 16 カテゴリが自動車専用道路上で発生する事故に対応している。

これらのカテゴリを構築したシナリオデータベースと比較した結果、16 カテゴリのうち 6 カテゴリが交通流シナリオ体系によってカバーされていることが確認された(図 D-2)。一方、残りの 10 カテゴリは、違法行為や予防不可能な事象を含むものであり、完全なカバーを達成するためには、車両エンジニアリング面での補完的なアプローチの導入が必要である可能性が示唆された。

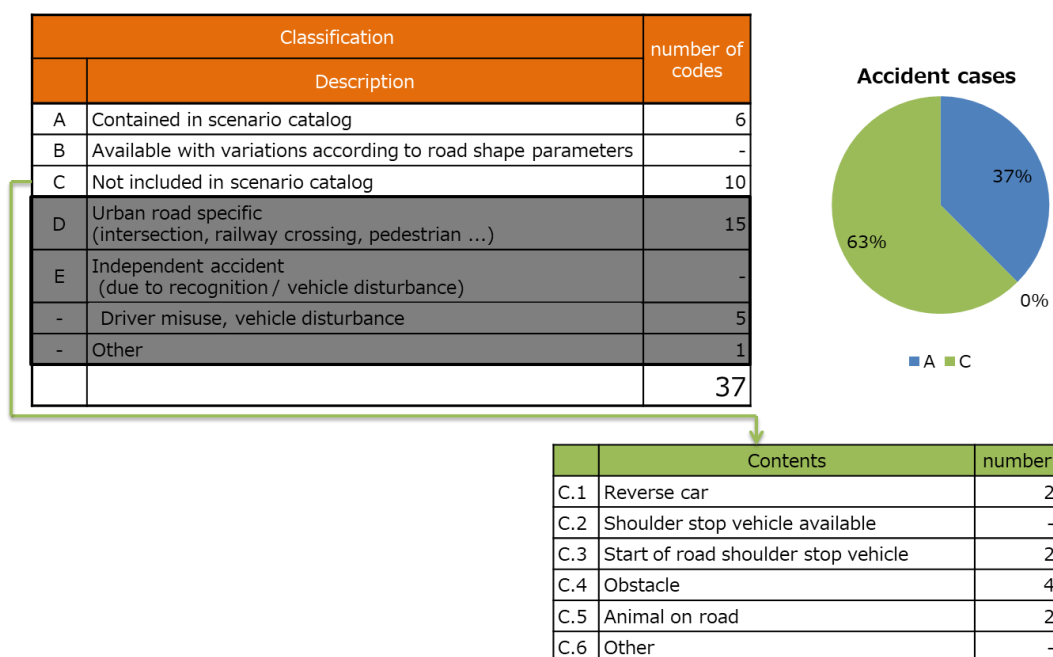


図 D-2. トラフィックシナリオデータベースと NHTSA 事前クラッシュカテゴリの比較

D.3 交通事故分析センター(ITARDA)データ

公益財団法人 交通事故総合分析センター(Institute for Traffic Accident Research and Data Analysis : ITARDA <https://www.itarda.or.jp/>)は日本国内で発生した交通事故を体系的にデータベース化している。そこで、ITARDA が提供する 2018～2019 年に発生した 633,639 件の交通事故データ(集計条件:表 D- 1)を用いた。これらのデータを一般車両の交通外乱シナリオ(図 23)と比較することにより、シナリオ体系の網羅性を検証することが可能である。

表 D- 1 事故データの集計条件

項目	ITARDA データ分類	集計の考え方
事故類型	「人対車両」「車両相互」「車両単独」「列車」	シナリオ体系が対車両との錯綜場面を対象としているため、車両相互事故に限定
事故内容	「死亡」「重傷」「軽傷」	完全性を検証することが目的であるため、人身事故全体を対象
道路形状	「交差点」「交差点付近」「単路」「踏切」「一般交通の場所」	ITARDA 事故データでは、合流部、分岐部を区分できないため、単路部に含める事故類型のうち「一般交通の場所」は分析対象外 「交差点付近」「単路」「踏切」を Functional Scenario 体系の単路部(合流/分岐部含)とした。ただし、単路部に分類される事故のうち、どちらかの車両の行動に「右折」もしくは「左折」が含まれる場合、あるいは、車両が交差方向から接近する場合は、交差点部に分類
項目	ITARDA データ分類	集計の考え方
当事者種別	「乗用車」「貨物車」「特殊車」「二輪車」「路面電車」「列車」「軽車両」「歩行者」「物件当」「相手なし」「対象外当事者」	シナリオ体系の自車および他車を ITARDA 事故データの第一当事者および第二当事者に置き換えて分析。自車は「乗用車」(ただしミニカーを除く)および「貨物車」とし、他車は「乗用車」「貨物車」「特殊車」「二輪車」「路面電車」「列車」「軽車両」とする
行動類型	「発進」「直進」「追越(抜)」「進路変更」「左折」「右折」「転回」「後退」「横断」「蛇行」「急停止」「停止」「駐車」「その他」「対象外当事者」	シナリオ体系の振舞い「Going straight」「Lane change / Swerving」「Turning」と行動類型を対応させて分析(表 D- 2 参照)
当事者の進行方向	「車両等道路規準」「車両等路外基準」	当事者の進行方向を基に、他車が自車に対してどの方向から接近するか(Same / Crossed(from R/L) / On coming)を判別

NOTE: 車両間で発生している事故のうち、AD 車は乗用車および貨物車に代替可能と考えて分析をするため、たとえば、交差点で右折する第一当事者と直進する第二当事者間の事故のようにどちらの車両にも

AD 車を代替できる事故については、AD 車を第一/第二当事者の両方に置き換えた場合を分析対象とする。このため、シナリオがカバーしている場面の件数は実際の事故件数よりも多くなる。

表 D-2 事故データ中の行動分類とシナリオ体系の振舞いの関係

Functional Scenario での振舞い	事故データの区分※ ¹
Going straight	「発進」「直進」「横断※ ² 」「急停止」「停止」「駐車」
Lane change / Swerving	「追越(抜き)」「進路変更※ ³ 」「蛇行」
Turning	「左折」「右折」「横断※ ² 」
Other	「その他」「対象外当事者」

※¹ AD 車の振舞いとしては太字のもののみを考慮

※² 沿道施設から車両が出てくる「横断」は、直進する場合を Going straight に右左折する場合を Turning に区分

※³ AD 車は交差点内では進路変更しないと仮定

D.4. 網羅性検証結果

D.4.1 一般車両の交通外乱シナリオの網羅性

ITARDA データを基に、シナリオ体系の構造に従って事故場面を分類し、各シナリオ別の発生傾向を分析した結果を表 D-3 に示す。縦軸に道路形状および自車の振舞い、横軸に他車の振舞いと接近方向を配置している。

シナリオ体系における道路形状は「Non-intersection(非交差点部)」「Merge(合流部)」「Branch(分岐部)」「Intersection(交差点部)」の 4 分類で構成されている。一方 ITARDA データにおいては合流部/分岐部を区分できないため、これらは「Intersection」に統合して集計した。

横軸の他車の接近方向については、自車と同一方向に進行する場合を「Same」、交差方向から接近する場合を「Crossed(from R/L)」、対向方向から接近する場合を「On coming」と定義している。

表中では、緑色のセルがシナリオ体系に含まれる事故場面の件数を、赤色のセルが詳細不明の事故場面の件数をそれぞれ示している。分析の結果、事故場面数緑色セルが 1,004,752 件、赤色セルが 1,128 件であった。

ここで、カバー率を「AD 車が遭遇し得る全事故場面(緑色セルおよび赤色セル)のうち、シナリオ体系によりカバーされている事故場面(緑セル)の割合」と定義すると、99.89%の事故場面がシナリオ体系によって網羅されていることが確認された(表 D-4)。

表 D-3 一般車両の交通外乱シナリオにおける ITARDA データ事故との対比結果

			Surrounding vehicle behavior and coming direction											
			Going straight			Lane Change/Swerving			Turning			Other		
			Same	Crossed	On coming	Same	Crossed	On coming	Same	Crossed	On coming	Same	Crossed	On coming
Road structure and Subject vehicle behavior	Non-intersection	Going straight	481K	-	29K	10K	-	2K	829	-	239	463	-	177
		Lane Change	14K	-	2K	646	-	30	8	-	0	26	-	2
	Intersection	Going straight	44K	215K	3K	1K	430	89	11K	28K	16K	117	214	29
		Turning	41K	49K	47K	1K	192	89	2K	3K	1K	29	43	36

表 D-4 一般車両の交通外乱シナリオのカバー率

項目	数値
Functional Scenario がカバーしている事故場面数(緑セル)	1,004,307[件]
詳細不明(赤セル)	1,136[件]
カバー率 [緑/(緑+赤)]	99.89%

D.4.2 交通弱者(自転車)の交通外乱シナリオの網羅性

交通弱者(自転車)は一般車両の交通外乱シナリオと同等の構造を有しており、同様に自転車事故データとの比較・分析を実施した(表 D-5)。分析の結果、事故場面数は緑色セルが 129,312 件、赤色セルが 200 件であった。カバー率を同様の定義とすると、99.85%の事故場面がシナリオ体系によって網羅されていることが確認された(表 D-6)。

表 D-5 自転車の交通外乱シナリオにおける ITARDA データ事故との対比結果

			Surrounding behavior and cyclist coming direction											
			Going straight			Lane Change/Swerving			Turning			Other		
			Same	Crossed	On coming	Same	Crossed	On coming	Same	Crossed	On coming	Same	Crossed	On coming
Road structure and Subject vehicle behavior	Non-intersection	Going straight	6,493	-	2,151	718	-	93	6	-	1	52	-	25
		Lane Change	326	-	40	31	-	6	0	-	0	1	-	2
	Intersection	Going straight	1334	56,872	761	138	160	20	1,326	4,026	299	15	69	5
		Turning	19,554	16,437	17,076	38	23	10	390	871	112	10	14	9

表 D-6 自転車の交通外乱シナリオのカバー率

項目	数値
Functional Scenario がカバーしている事故場面数(緑セル)	129,312[件]
詳細不明(赤セル)	200[件]
カバー率 [緑/(緑+赤)]	99.85%

D.4.3 交通弱者(歩行者)の交通外乱シナリオの網羅性

交通弱者(歩行者)については ITARDA、ドイツ IGLAD(*Initiative for the Global Harmonization of (in-depth) Accident Data* : <https://iglad.org>)、およびオーストラリア DCA(Definitions for Classifying Accident)の事故パターンと交通弱者(歩行者)の交通外乱シナリオ(図 27)と対応付けを行い、その網羅性を検証した。

表 D-7 歩行者の交通外乱シナリオにおける各事故パターンとの対比結果

			Pedestrian behavior					
			ITALDA		IGLAD		DCA	
			On driving path	Into driving path	On driving path	Into driving path	On driving path	Into driving path
Road structure and Subject vehicle behavior	Non-intersection	Going straight	8	22	5	15	3	4
		Lane Change	—	—	6	—	—	—
	Intersection	Going straight	2	11	—	27	—	1
		Turning	1	9	—	12	—	1

※数値は対歩行者シナリオで網羅できる対象事故パターンの数

シナリオ比較の結果を表 D-7 に示す。表中の数値は、各比較対象の事故パターンと歩行者の交通外乱シナリオを照合した際に、該当した件数を示している。比較の結果、ITALDA の事故パターンにおいて該当しないパターンが 2 件確認された。これらは、車両の後退により歩行者と衝突した事故であるが、いずれも駐車場など一般公道外で発生した事例であり、一般道上における自動運転車両の安全性評価において必要とされるシナリオはすべて網羅されていると判断できる。

一方、比較対象の事故パターン (ITALDA, IGLAD, DCA) のうち、歩行者の交通外乱シナリオに該当する事例が少ない、あるいは存在しないカテゴリが認められた。これは、各事故パターンの分類体系における詳細度の違いに起因すると考えられる。たとえば、ITALDA の事故パターンは自車両の直進および旋回動作を区分している一方で、車線変更については独立した分類を設けていない。そのため、車線変更を伴う事故が直進のカテゴリに包含されている可能性がある。

また、IGLAD では 6 件の車線変更時の事故パターンが確認されているが、これらは主に前方障害物を回避した後の事故として扱われており、結果的に自車両の直進とおよび旋回動作で分類されていると考えられる。さらに IGLAD および DCA の事故パターンにおいて交差点の上の“On driving path”に該当するケースが存在しないのは、単路での事故として整理されていると推察される。

このように、自車両の行動分類の定義が異なるため、一対一の対応関係を厳密に構築することは困難である。しかし、比較対象の事故パターンはいずれも歩行者の交通外乱シナリオに包含されており、全体としてシナリオ体系は歩行者関連の事故パターンを十分に網羅していると考えられる。

Annex E 認識外乱の原理モデルと評価シナリオ

3.4.2.1 で述べたように、原理に基づく認識外乱シナリオを導出するためには、各センサの原理モデルを理解し、そのモデルを構成するパラメータの種類および範囲を定義する必要がある。以下では、ミリ波レーダ、LiDAR、カメラの各センサにおける認識外乱について、原理モデルやパラメータの種類・範囲に加え、これらから導出される評価シナリオの代表例を示す。代表例としては、発生頻度の高い現象に関連するものに加え、専用路線などで実施される実証実験で懸念される歩行者の進入、雨滴、路面の水たまりなどの事例も取り上げた。

E.1 原理モデル記述と評価シナリオ導出のプロセス

認識外乱の原理モデルおよび評価シナリオは、以下の手順により導出する。

1. 認識外乱として発生する現象を記述し、その特性を明確化して現象パラメータを特定する
2. 上記現象を記述可能な物理モデル(=原理モデル)を構築し、原理パラメータを特定する
3. 原理パラメータの変化に影響を及ぼす外乱要因(Disturbance factor) および 外乱要因パラメータ(Disturbance factor parameter)をそれぞれ列挙する
4. 各外乱要因パラメータについて、取り得る値の範囲を特定する
5. 認識外乱を外乱要因パラメータの変化として表現し、これに交通流シナリオを組み合わせたものを、認識外乱の評価シナリオとする

評価シナリオで扱う外乱要因は、同一の原理モデルで記述されるものがあれば、いずれを選択してもよい。ただし、外乱要因パラメータ範囲がシステム ODD 範囲を十分にカバーしていることが求められる。

ここで、上記プロセスで導出された、現象パラメータ、原理パラメータ、外乱要因、外乱要因パラメータの関係の例を図 E-1 に示す。

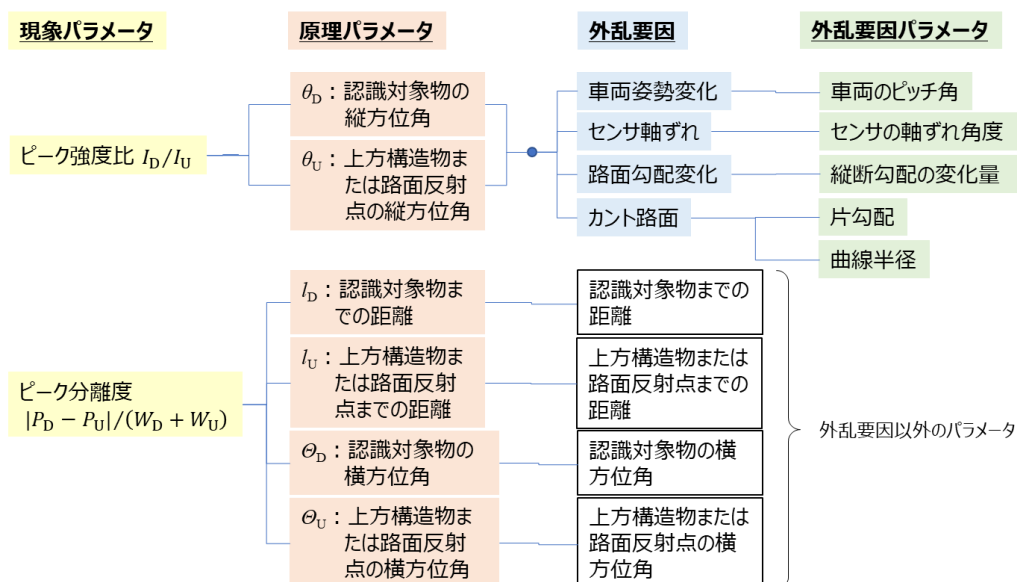


図 E-1：認識外乱の現象パラメータ・原理パラメータ・外乱要因・外乱要因パラメータの関係の例

これ以降は、各センサにおける認識外乱の原理モデルおよび評価シナリオの記述例を示す。評価シナリオのうち、自車速度を「ODD 内の最大車速」として設定しているものについては、安全性評価の観点から、認識対象物との衝突までの時間が最も短くなる条件を選定して記載している。

E.2 ミリ波レーダの原理モデルと評価シナリオ

ミリ波レーダについては、例として以下の5つの認識外乱の発生原理に関し、原理モデルおよび評価シナリオを記述する。

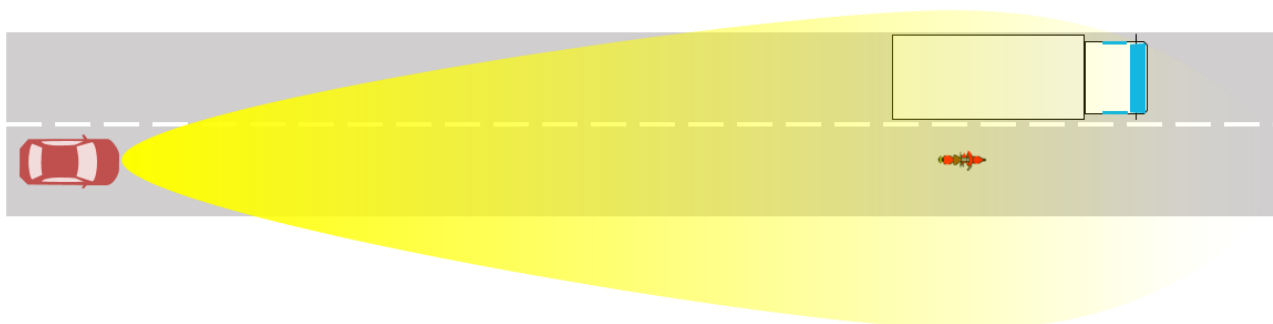
- 信号(S)強度差大（認識対象物）
- 低 D/U（路面マルチパス）
- 低 D/U（方位角変化）
- 低 S/N（車両の向き）
- 低 D/U（構造物）

E.2.1【ミリ波レーダ】信号(S)強度差大（認識対象物）

E.2.1.1 現象と原理

E.2.1.1.1 現象

強い反射を生じる大型車両などの大型車両の側方を、相対的に反射強度の小さい歩行者や二輪車等が走行する場合、大型車両からの受信信号が支配的となり、歩行者や二輪車からの信号がその中に埋もれてしまう。その結果、センサが小さな対象物を検出できず、False Negative(未検知)が発生する。



現象パラメータ

反射点群

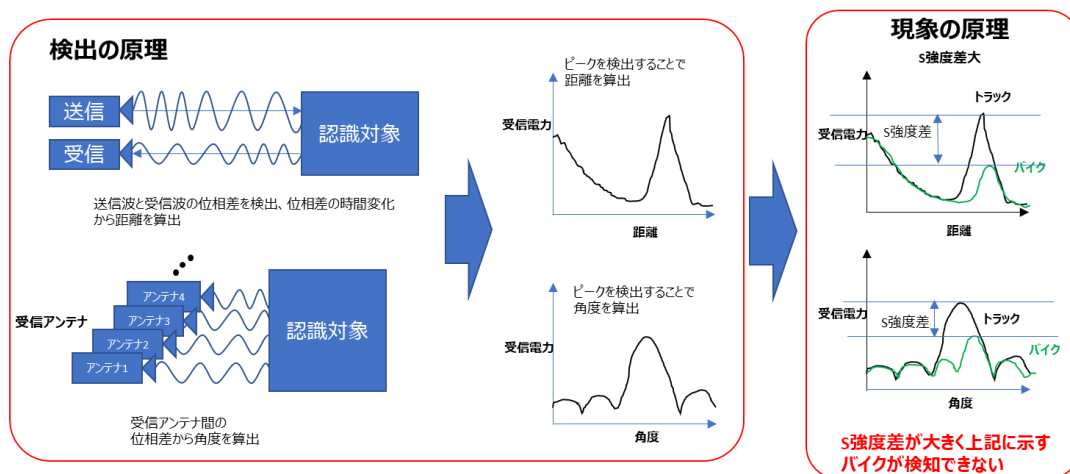
範囲	程度・量	時間
認識対象物側面全体	完全に取得できない	取得出来ない状態が持続

E.2.1.1.2 原理

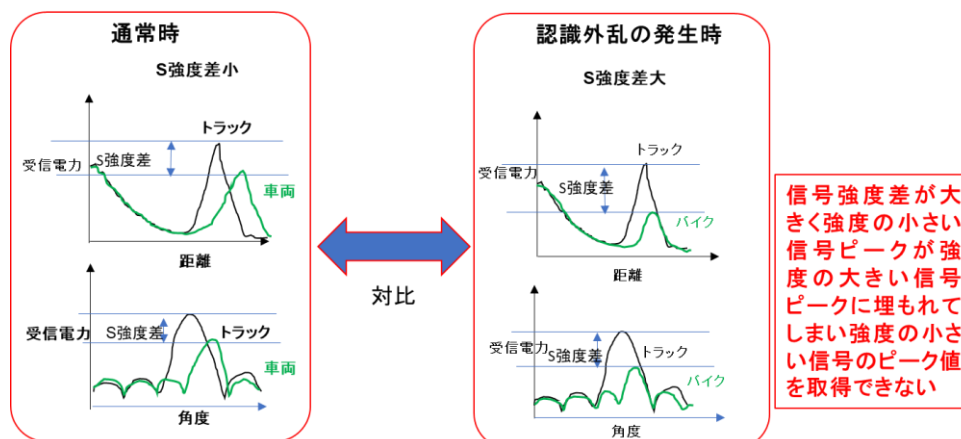
対象物からの反射強度に大きな差がある場合、反射強度の大きい信号に小さい信号が埋もれてしまい、反射強度の小さい認識対象物を検出できなくなる。

下図の左側に示すように、送信信号は複数アンテナで照射され、対象物(大型車両、二輪車)からの反射波が受信部に戻る。

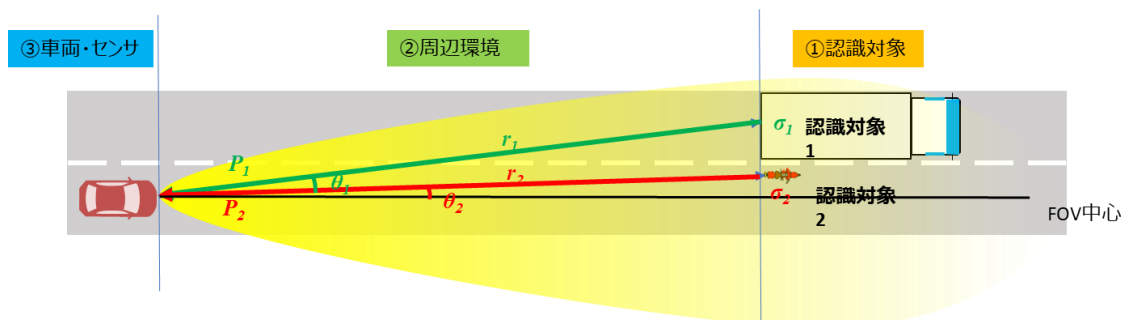
下図の右側に示すように、認識対象物の距離検知(上段)、角度検知(下段)のいずれにおいても、受信信号の中で、大型車両からの強い反射成分が主要なピークを形成し、二輪車の弱い信号はノイズレベル付近に埋没する現象が発生する。



通常時と認識外乱発生時を対比すると、下図のようになる。



E.2.1.1.3 原理モデル



信号 S の強度は反射信号の電力値であり電力を記述するモデルに着目する

認識対象 n からの反射波の電力は、

$$P_n = \frac{\lambda^2 \{G(\theta_n)\}^2 P_t}{(4\pi)^3 r_n^4} \sigma_n$$

P_t : 送信電波の電力

P_n : 認識対象 n からの反射電波の電力

λ : 電波の波長

$G(\theta)$: アンテナ利得

σ_n : 認識対象 n の反射(断面積)

※認識対象物が n 個ある場合 P, r, σ の添え字に認識対象物番号を代入

認識対象が 2 つある場合、反射波の電力はそれぞれ、

$$P_1 = \frac{\lambda^2 \{G(\theta_1)\}^2 P_t}{(4\pi)^3 r_1^4} \sigma_1 \quad P_2 = \frac{\lambda^2 \{G(\theta_2)\}^2 P_t}{(4\pi)^3 r_2^4} \sigma_2$$

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \left| \frac{E_s(\vartheta, \varphi)}{E_i} \right|^2$$

一方、認識対象物のレーダ反射断面積(RCS) σ は投影面積、反射率、散乱波の指向性の積で表される。

投影面積は認識対象物における反射面の面積であり、認識対象物の形状・向き、大きさ及び相対位置に依存する。

反射率は誘電率と入射角度に依存し、誘電率が材質に依存するパラメータである。

垂直偏波の場合

$$R_p = \frac{|\varepsilon_2 \cos \psi_0 - \sqrt{\varepsilon_1(\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \sin^2 \psi_0)}|^2}{|\varepsilon_2 \cos \psi_0 + \sqrt{\varepsilon_1(\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \sin^2 \psi_0)}|^2}$$

R_p : 水平偏波の反射率

R_s : 垂直偏波の反射

ε_1 : 空気中の誘電率

ε_2 : 反射物の誘電率

水平偏波の場合

$$R_s = \frac{|\sqrt{\varepsilon_1} \cos \psi_0 - \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \sin^2 \psi_0}|^2}{|\sqrt{\varepsilon_1} \cos \psi_0 + \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \sin^2 \psi_0}|^2}$$

ψ_0 : 電波の入射角

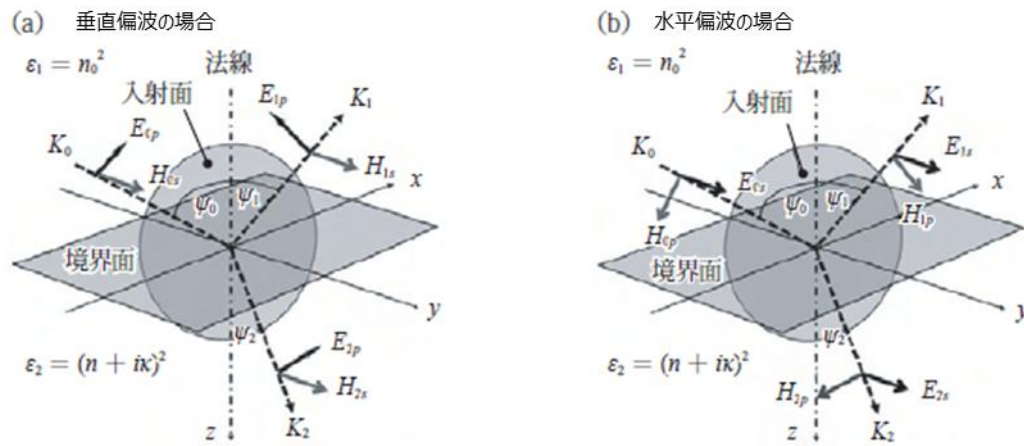
ε_r : 金属の誘電率

ω : 電波の周波数

ω_p : プラズマ周波数

認識対象物が金属の場合の誘電率 ε_r は

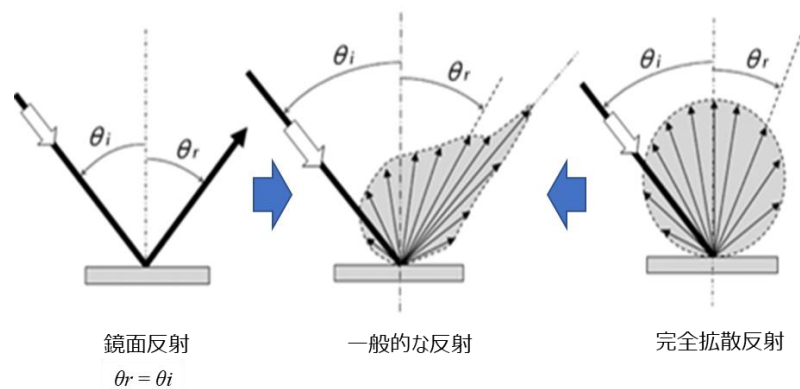
$$\varepsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$



http://home.sato-gallery.com/research/reflection_mechanism_proof.pdf

※誘電率と比誘電率の関係⇒比誘電率=媒質の誘電率/真空中の誘電率

散乱波の指向性は鏡面反射と完全拡散反射を組み合わせた反射が一般的である。

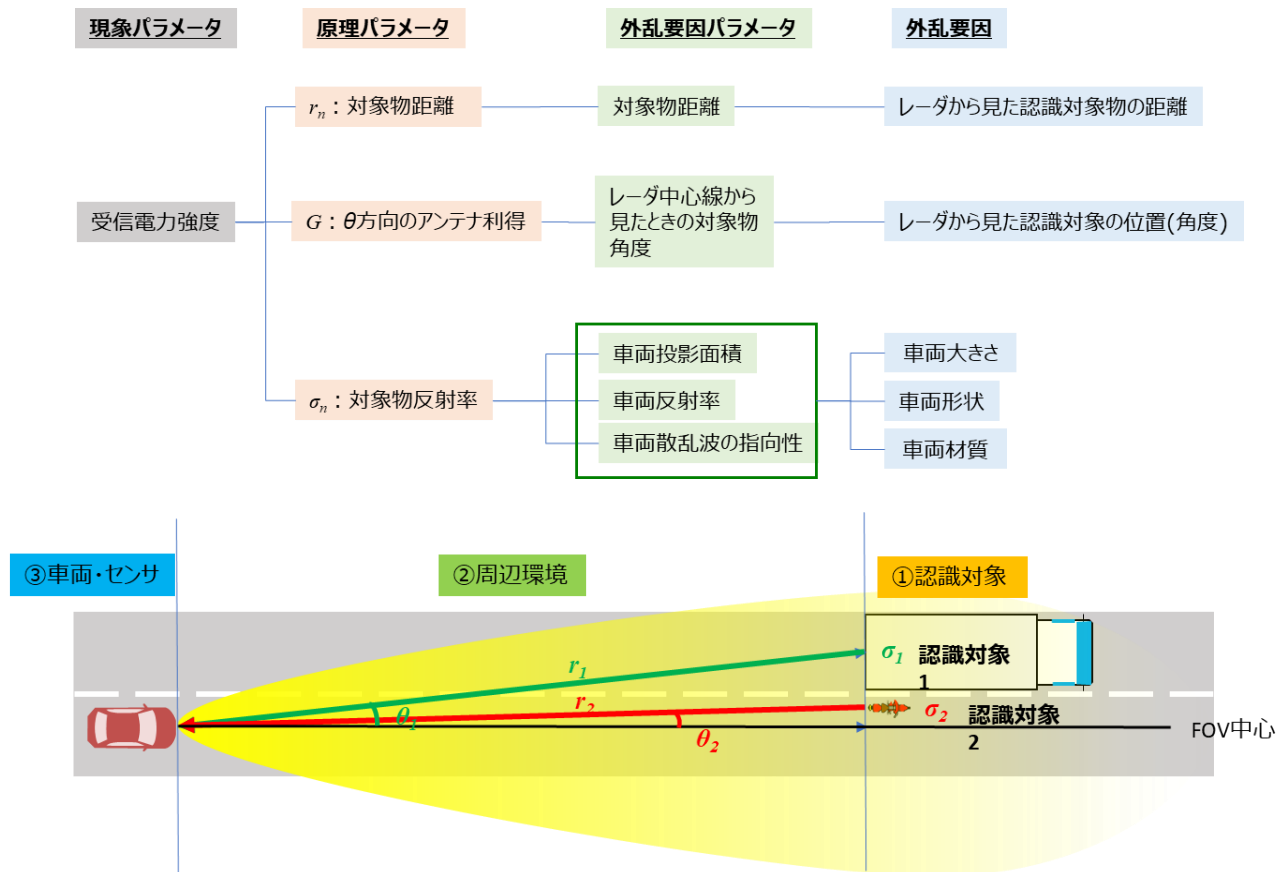


以上のように、認識対象からの反射信号 S の強度は電力値 P に依存、電力値 P はセンサと認識対象との位置関係と、認識対象の RCS に依存する。よって、認識外乱を記述する際には、センサと認識対象との距離と角度および RCS を考慮すればよい。

E.2.1.2 認識外乱の原理と外乱要因との関係

E.2.1.2.1 原理に基づく外乱要因

現象パラメータ、原理パラメータ、外乱要因パラメータと外乱要因の関係は、以下のようになる。



現象パラメータ	原理パラメータ	外乱要因パラメータ	原理パラメータの変化に寄与する外乱要因		
			①認識対象	②周辺環境	③車両・センサ
信号強度	認識対象距離	認識対象距離(r_n)	認識対象物との相対位置	—	—
	アンテナ利得	認識対象角度(θ_n)	認識対象物の3D形状	—	—
	再起反射率 RCS値(σ_n)	認識対象物の形状	大きさ	—	—
		認識対象物の大きさ	色	—	—
		車両の材質(誘電率)	材質	—	—
	認識対象物の組み合わせ	←	—	—	—

E.2.1.2.2 パラメータ範囲

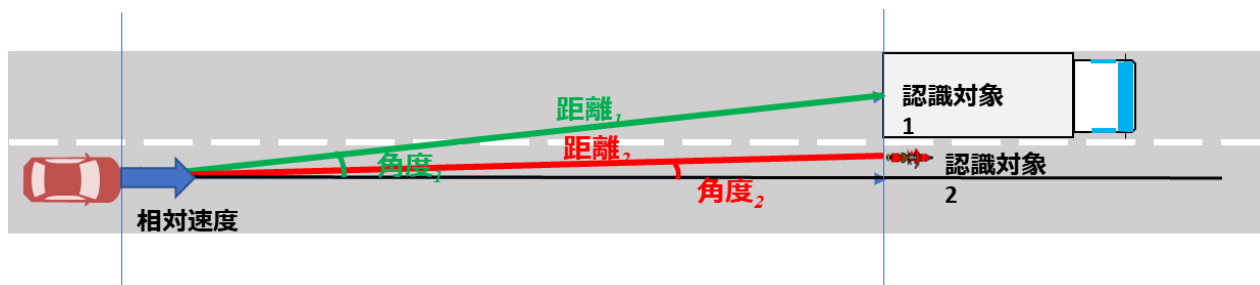
現象パラメータ、原理パラメータ、外乱要因パラメータの範囲を示す。

現象パラメータ	原理パラメータ	外乱要因パラメータ	外乱要因		パラメータの範囲	考え方
信号強度	認識対象距離	認識対象距離(r_n)	対象物との相対位置	距離	最小検知距離～最大検知距離	レーダの知覚部分を評価するために距離はレーダのスペックに基づく範囲で検証
	アンテナ利得	認識対象角度(θ_n)		角度	FOVの範囲内	角度に関しても考え方は距離の場合と同じくレーダのスペックに基づきFOV内でパラメータを振り検証
	再起反射率 RCS値(σ_n)	認識対象物の形状	認識対象物の形状 (3D)		人及び道路交通法に基づく自動車に分類される認識対象物 最初のSTEPとして大型自動車と普通自動車二輪車	自専道走行可能な車両＋緊急時の停車車両横を歩行する人を考慮
		認識対象物大きさ	認識対象物大きさ		車両:原動機付き自転車相当～大型自動車相当 人:---	自専道走行可能な車両＋緊急時の停車車両横を歩行する人を考慮
		車両の材質	色		ミリ波帯の反射、透過率データに基づき設定	可視光の色とミリ波帯の物性値の相関は無いためデータベースが必要
			材質		ミリ波帯の物性値データに基づき設定	ミリ波帯の物性値データベースが必要
	認識対象物の組み合わせ	—	—		人、及び道路交通法に基づく自動車に分類される認識対象物	自専道走行可能な車両＋緊急時の停車車両横を歩行する人を考慮

E.2.1.2.3 評価シナリオ

以下の考え方で、評価シナリオを設定する。

- ・ 反射強度の大きい認識対象と反射強度の小さい認識対象を用いる
- ・ 認識対象が自車に対し接近方向の相対速度を持ったシナリオとする
- ・ 認識対象となる車両や二輪車等の種類や位置関係を変化させる



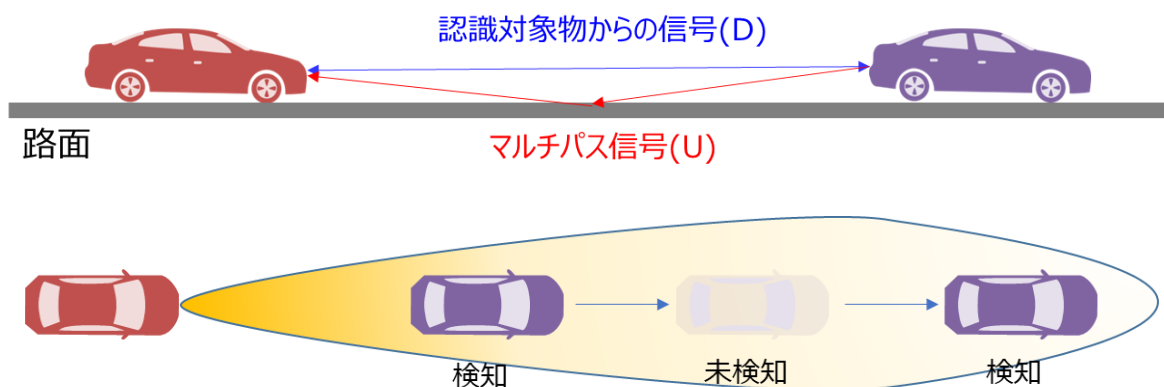
パラメータの項目	範囲		説明
認識対象までの距離	変化	最小検知距離～最大検知距離	センサーの最小検知距離から最大検知距離の範囲で距離を変化させ検証
認識対象までの角度	変化	FOVの範囲内	レーダのFOV範囲内角度をふり検証
認識対象の数	固定	2	反射強度の大小に対応する認識対象それぞれ1つずつを想定
認識対象との相対速度	固定	最小検知速度～最大検知速度	レーダ最小検知速度～最大検知速度の範囲で検証
認識対象物の種類と組み合わせ	固定	車両/バイク/歩行者	交通参加者の代表/反射率の高い対象物と反射率の低い対象物

E.2.2【ミリ波レーダ】低 D/U （路面マルチパス）

E.2.2.1 現象と原理

E.2.2.1.1 現象

認識対象物からの信号(D:Desired Signal)と、路面反射などの間接経路を介して到達する信号(U:Undesired Signal)が干渉することにより、認識対象物からの有効信号強度が低下する。結果として False Negative(未検知)が発生する。

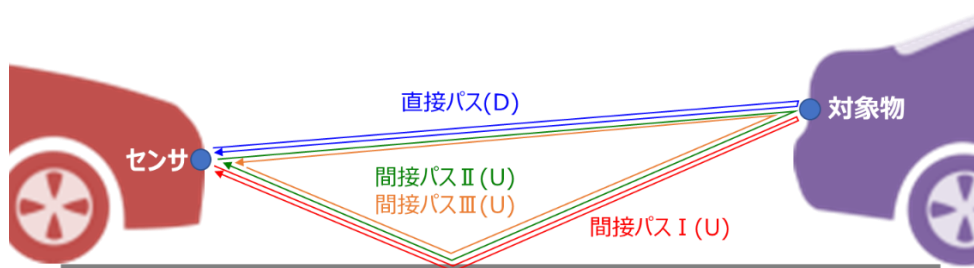


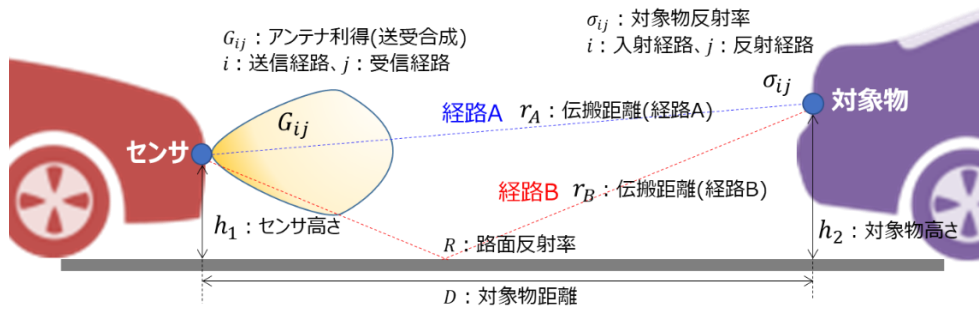
E.2.2.1.2 原理

センサから送信した電波が認識対象物に反射し再びセンサで受信する際の伝搬経路は下表の4パターンが想定される。

D/U	信号パス	伝搬経路
D:Desired-Signal	直接パス	センサ→認識対象物→センサ
U:Undesired-Signal	路面を介した間接パスⅠ	センサ→路面→認識対象物→路面→センサ
	路面を介した間接パスⅡ	センサ→認識対象物→路面→センサ
	路面を介した間接パスⅢ	センサ→路面→認識対象物→センサ

センサが受信する電波は、複数の経路を通過した反射波の重ね合わせで構成される。各経路において反射特性や伝搬距離が異なるため、受信信号の振幅および位相に差が生じる。その結果、センサ・認識対象物・路面の相対的な位置関係によって、受信する信号強度が増減する。





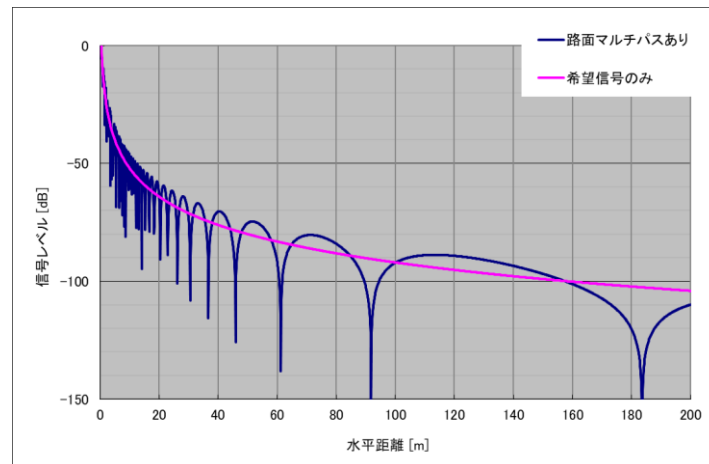
各経路での受信信号は下記のように算出される。

経路	信号振幅	信号位相
直接パス 経路A→経路A	$\frac{P_{tx}\lambda^2}{(4\pi)^3} \cdot \frac{G_{AA}\sigma_{AA}}{r_A^4}$	$\phi_0 + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (2r_A)$
間接パスⅠ 経路B→経路B	$\frac{P_{tx}\lambda^2}{(4\pi)^3} \cdot \frac{G_{BB}\sigma_{BB}R^2}{r_B^4}$	$\phi_0 + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (2r_B) + 2\pi$
間接パスⅡ 経路A→経路B	$\frac{P_{tx}\lambda^2}{(4\pi)^3} \cdot \frac{G_{AB}\sigma_{AB}R}{r_A^2 r_B^2}$	$\phi_0 + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (r_A + r_B) + \pi$
間接パスⅢ 経路B→経路A	$\frac{P_{tx}\lambda^2}{(4\pi)^3} \cdot \frac{G_{BA}\sigma_{BA}R}{r_B^2 r_A^2}$	$\phi_0 + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (r_A + r_B) + \pi$

(λ : 波長)

伝搬距離 r_A, r_B および送信経路 i , 受信経路 j は、センサ高さ h_1 , 対象物高さ h_2 , 対象物距離 D により決まる。

各経路の信号の重ね合わせ(干渉)により、条件に応じた特定の距離で受信信号強度が低下する。

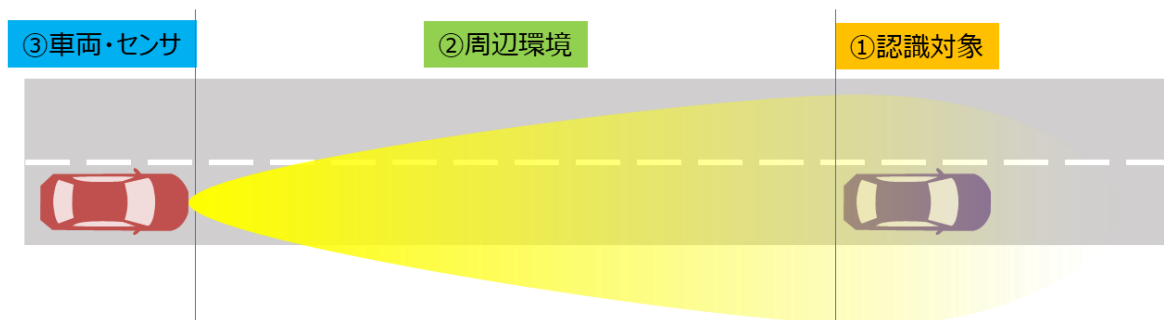
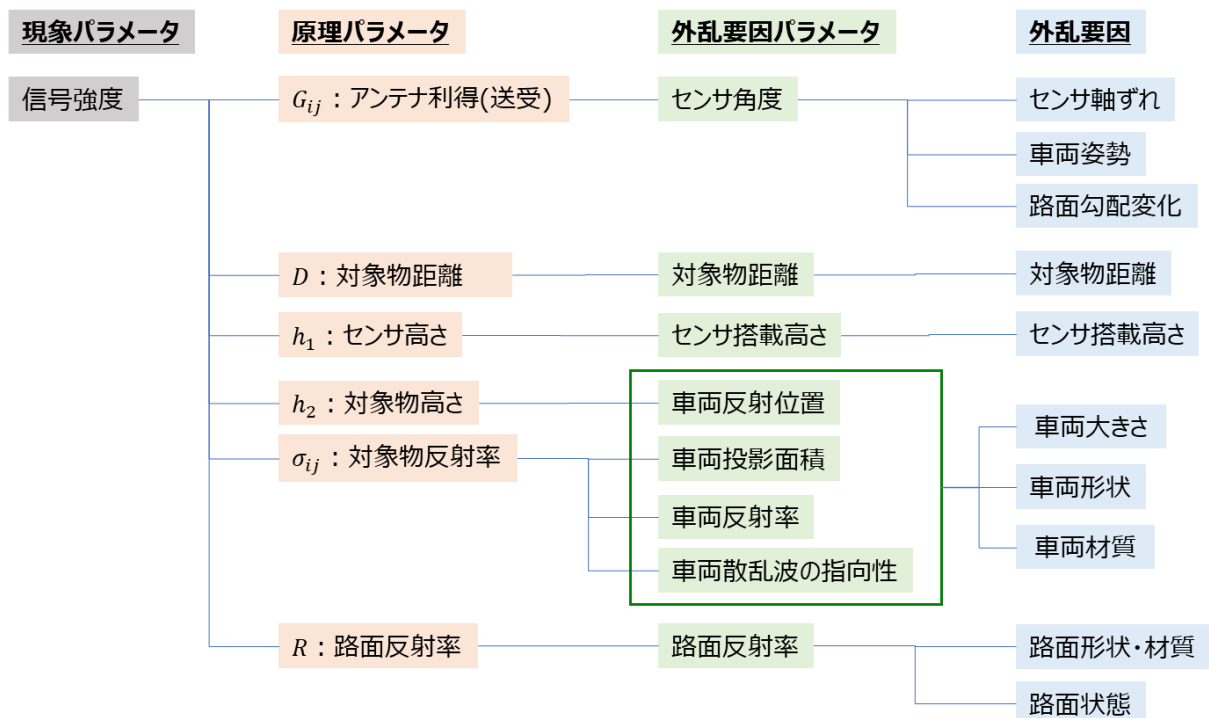


※直接パス+間接パスⅠの例

E.2.2.2 認識外乱の原理と外乱要因との関係

E.2.2.2.1 原理に基づく外乱要因

“信号強度”を現象パラメータと位置づけ、これに寄与する原理パラメータ、外乱要因パラメータ、外乱要因の関係を整理する。



現象パラメータ	原理パラメータ	外乱要因パラメータ	外乱要因		
			①認識対象	②周辺環境	③車両・センサ
信号強度	アンテナ利得	センサ角度	—	路面の勾配変化	センサ軸ずれ 車両姿勢変化
	対象物距離	←	対象物距離	—	—
	センサ高さ	センサ搭載高さ	—	—	センサ搭載高さ
	対象物高さ 対象物反射率	車両反射位置	車両大きさ 車両形状 車両材質	—	—
		車両投影面積		—	—
		車両反射率		—	—
		車両散乱波の指向性		—	—
	路面反射率	←	—	路面形状・材質 路面状態	—

E.2.2.2.2 パラメータ範囲

現象パラメータ、原理パラメータ、外乱要因パラメータの範囲を以下に示す。

現象 パラメータ	原理 パラメータ	外乱 パラメータ	外乱要因	パラメータ範囲	考え方
信号強度	アンテナ 利得	センサ角度	センサ軸ずれ	軸ずれ角度: 0°～軸ずれ自己検知最小角度	軸ずれ自己検知が作動する最小角度
			車両姿勢変化	ピッチ角: 0°～ピッチ最大角	その車両の取り得る最大角度
			路面の勾配変化	縦断勾配: -9～9%	道路構造令第20条より
	対象物距離	←	←	対象物距離: 最小検知距離～最大検知距離	センサの最小検知距離から最大検知距離まで
	センサ高さ	センサ搭載高さ	←	搭載高さ: 搭載位置範囲	搭載想定位置の範囲
	対象物高さ	車両反射位置 車両投影面積 車両反射率	車両大きさ 車両形状 車両材質	道路交通法に基づく自動車に分類される認識対象物最初のステップとして特徴的な3種 大型車(車高: 高) 普通車(車高: 中) 小型車(車高: 低)	車両の大きさ、形状、材質が各原理パラメータに複雑に影響する。大型車、普通車、小型車などの代表例を計測し、各原理パラメータへの影響の検証が必要
	路面反射率	←	路面形状・材質	想定される全ての走路 アスファルト、コンクリート、砂利、砂、石畳……	材質と路面状態による反射特性に与える影響を計測し検証が必要
			路面状態	想定される全ての路面状態 ウェット、アイスバーン、道路修復跡、積雪、轍……	

E.2.2.2.3 評価シナリオ

自車線前方の認識対象物(静止車両)に一定速で接近する。



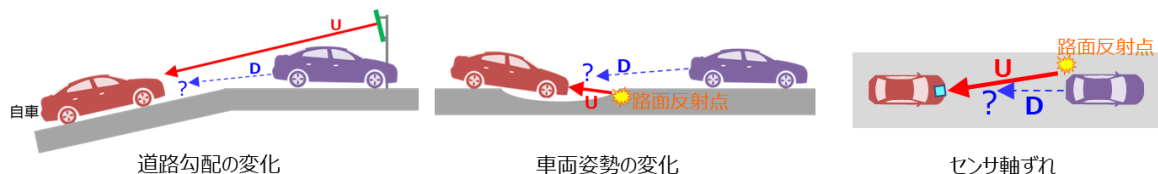
パラメータ項目	変化／固定	範囲	説明
対象物までの距離	変化	最小検知距離～最大検知距離	センサスペックに基づく範囲で検証
相対車速	固定	ODD内の最高速度	
対象物の種類	固定	大型車(車高: 高) 普通車(車高: 中) 小型車(車高: 低)	大型車、普通車、小型車などの代表例を3水準
路面材質	固定	アスファルト / 鉄板(TBD)	代表的な路面材質／鏡面反射率の高い路面材質
路面状態	固定	通常 / ウェット	通常の路面状態／鏡面反射率の高い路面状態

E.2.3【ミリ波レーダ】低 D/U（方位角変化）

E.2.3.1 現象と原理

E.2.3.1.1 現象

道路の勾配やカント（横断傾斜）、車両姿勢、およびセンサの取付軸ずれなどの影響により、レーダの視野中心軸（FOV 中心軸）と路面または進行方向との間に角度が生じる場合がある。このとき、認識対象物からの反射信号（D:Desired Signal）が、周辺構造物からの不要反射信号（U:Undesired Signal）よりも相対的に小さくなり、信号が埋もれることで False Negative（未検知）が発生する。



現象パラメータは、以下に示すピーク強度比およびピーク分離度とする。

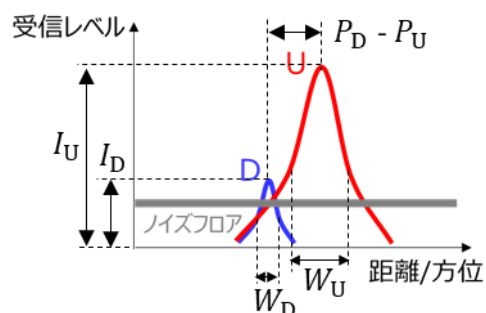
ピーク強度比 $\frac{I_D}{I_U}$

I_D, I_U : ピーク強度

ピーク分離度 $\frac{|P_D - P_U|}{W_D + W_U}$

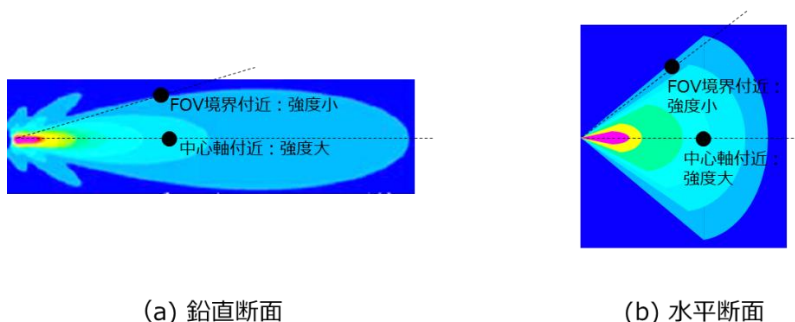
P_D, P_U : ピーク位置

W_D, W_U : ピーク半値幅



E.2.3.1.2 原理

レーダ送信波の強度分布を鉛直および水平方向の各断面で見ると、視野中心軸（FOV 中心軸）から離れるほど、送信波の強度は相対的に低下する。そのため、同一の反射対象物であっても、FOV 中心軸付近に存在する場合と FOV 境界付近に存在する場合とでは、受信される反射信号強度に差が生じる。

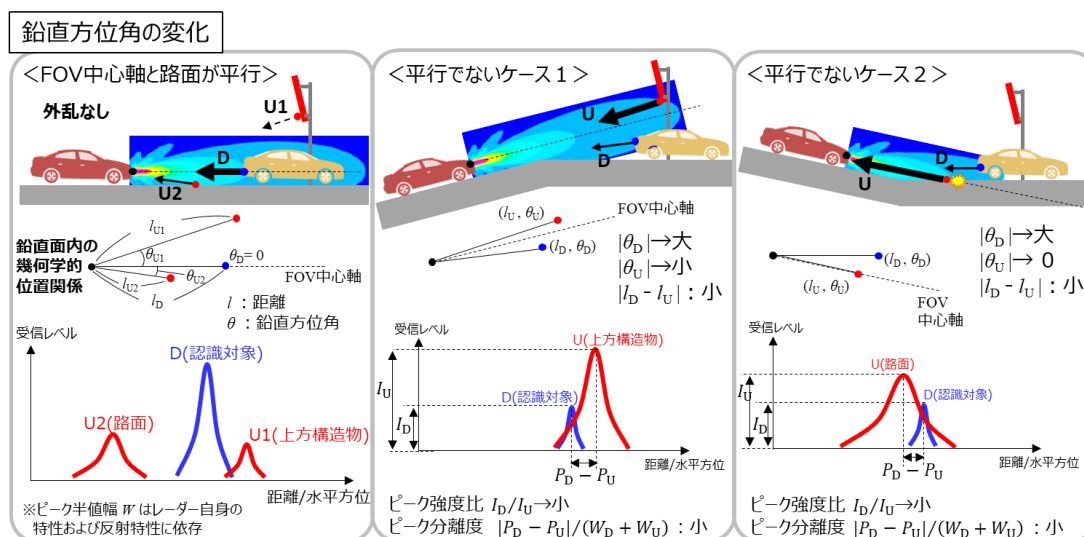


ミリ波レーダから放射される電波強度分布

センサの視野中心軸(FOV 中心軸)が路面または進行方向に対して非平行となると、周辺構造物が中心軸側に近づく一方で、認識対象物は FOV 境界側に位置するようになる ($|\theta_U| \rightarrow$ 小, $|\theta_D| \rightarrow$ 大)。このとき、周辺構造物からの不要信号(U)の強度 I_U は、認識対象物からの信号(D)の強度 I_D よりも相対的に大きくなる。

さらに、ピーク分離度が低い条件(すなわち、 $|P_D - P_U|$ が小さい、または $|W_D + W_U|$ が大きい)が重なると、D は U に埋没する。

下図に認識対象物と周辺構造物の鉛直方位角が変化した場合に、信号 D と U の関係がどのように変化するかを示す。



センサ FOV 中心軸と路面が平行な場合(左図):

認識対象物からの信号(D)が大きく、路面や上方構造物からの反射信号(U1, U2)は相対的に小さいため、認識対象物を安定して検出できる。

上に凸の上り勾配の場合(中央図):

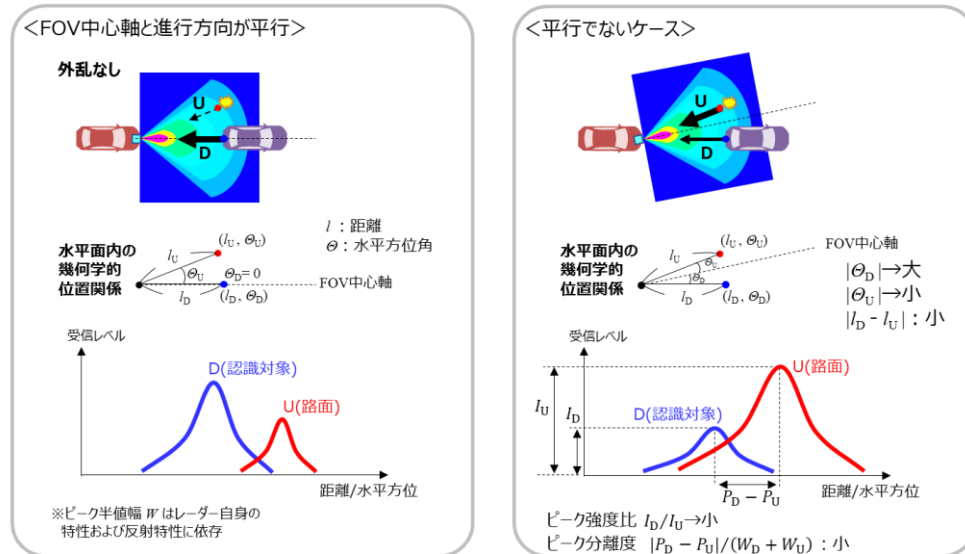
認識対象物よりも上方構造物のほうがセンサ FOV 中心軸に近くなるため、上方構造物からの反射信号(U)が大きく、認識対象物からの信号(D)が小さくなる。

下に凸の勾配の場合(右図):

認識対象物よりも路面のほうがセンサ FOV 中心軸に近くなるため、路面からの反射信号(U)が大きく、認識対象物からの信号(D)が小さくなる。

同様に、認識対象物と周辺構造物の水平方位角が変化した場合に、信号 D と U の関係がどのように変化するかを示す。

水平方位角の変化



センサ FOV 中心軸と進行方向が平行な場合（左図）：

認識対象からの信号(D)が大きく、周辺構造物からの反射信号(U)は相対的に小さいため、認識対象物を安定して検出できる。

センサ FOV 中心軸と進行方向が平行でない場合（右図）：

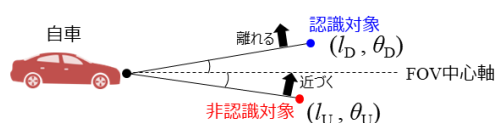
センサの軸ずれ等により、FOV 中心軸が自車進行方向からずれている状態であり、認識対象物よりも周辺構造物のほうがセンサ FOV 中心軸に近くなるため、路面からの反射信号(U)が大きく、認識対象物からの信号(D)が小さくなる。

このように、方位角の変化が鉛直方向の場合と水平方向の場合とで起こる現象は同一であるため、これ以降は鉛直方位角の変化による低 D/U について記述する。

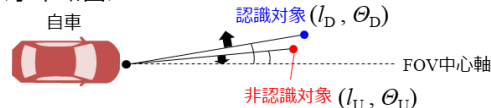
D が U に埋もれる際のパラメータ条件：

- 方位角 $|\theta_D| \rightarrow$ 大 または $|\theta_U| \rightarrow$ 大 （FOV 中心軸から離れる）
- 方位角 $|\theta_U| \rightarrow$ 小 または $|\theta_D| \rightarrow$ 小 （FOV 中心軸に近づく）
- 対象までの距離 $l_D \approx l_U$
- 対象の横方位角 $\theta_D \approx \theta_U$
- 反射波のピーク半値幅の和 $W_D + W_U \rightarrow$ 大
（※レーダー自身の特性および反射特性に依存）

＜鉛直断面＞

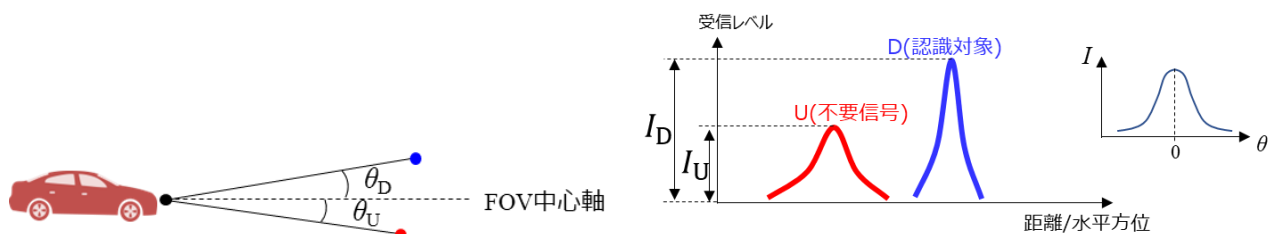


＜水平断面＞



原理パラメータ:

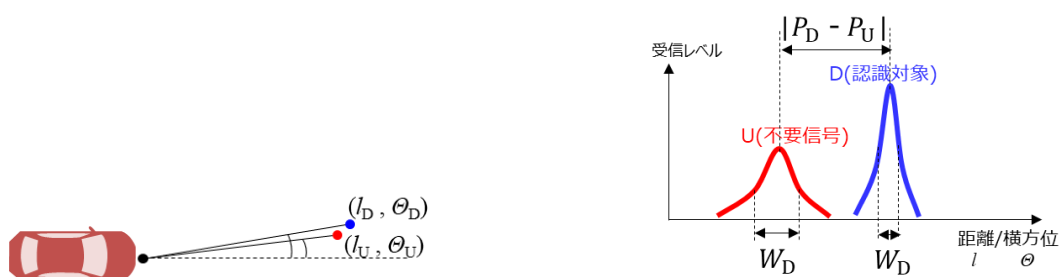
方位角 $\theta_D, \theta_U, \theta_D, \theta_U$ (変化する原理パラメータ)
 $\Rightarrow I_D/I_U$ の値に影響



距離 l_D, l_U

横方位角 θ_D, θ_U

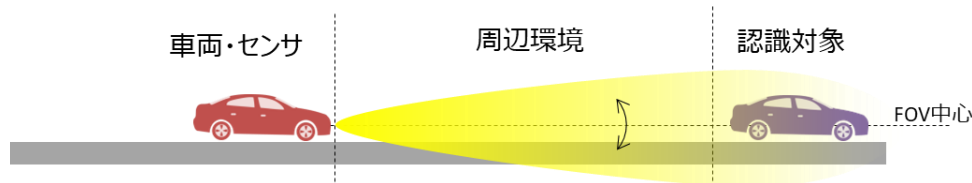
$\Rightarrow |P_D - P_U|/(W_D + W_U)$ の値に影響



E.2.3.2 認識外乱の原理と外乱要因との関係

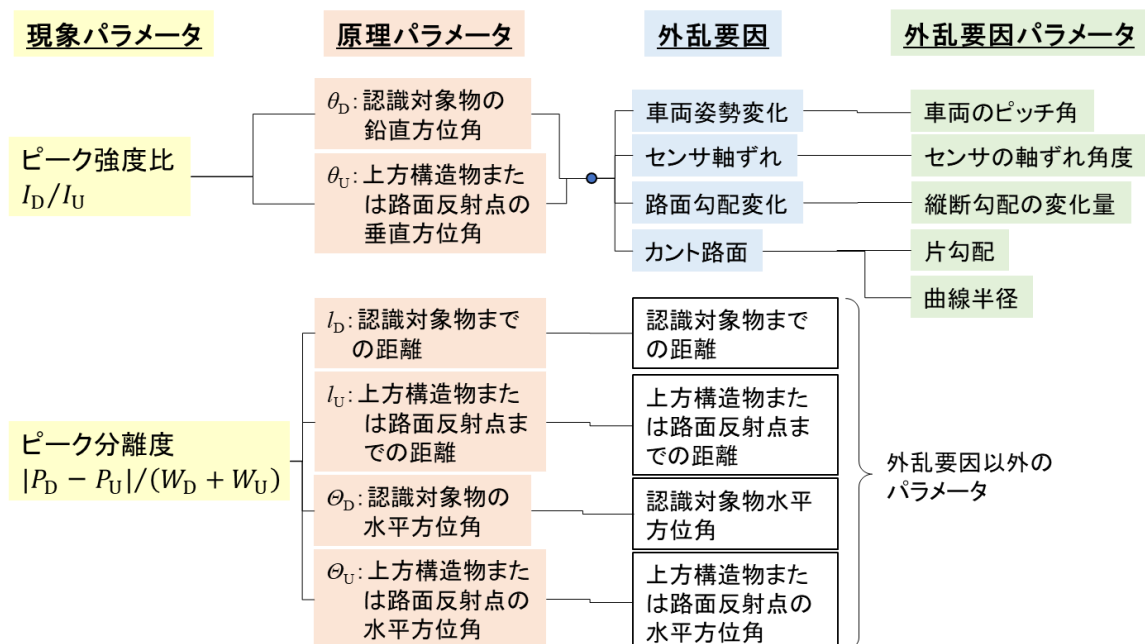
E.2.3.2.1 原理に基づく外乱要因

原理パラメータのうち、本現象の要因となる鉛直方位角 $|\theta_D| \rightarrow$ 大、 $|\theta_U| \rightarrow$ 小 の変化を引き起こす外乱要因には、以下のものがある。



変化する 原理パラメータ	外乱要因		
	車両・センサ	周辺環境	認識対象
鉛直方位角 θ_D, θ_U	• 車両姿勢変化 	• 路面の勾配変化 	該当なし
	• センサ軸ずれ 	• カント路面 	

現象パラメータ、原理パラメータ、外乱要因パラメータの関係は、以下のようになる。



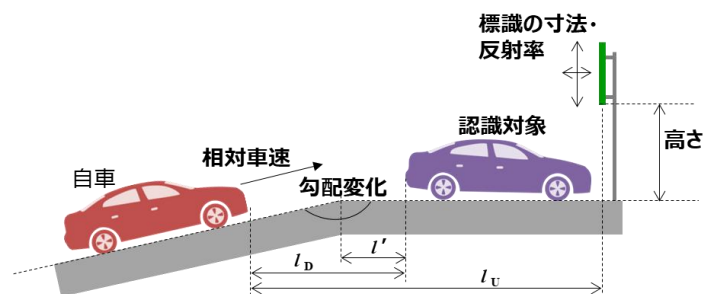
E.2.3.2.2 パラメータ範囲

現象パラメータ、原理パラメータ、外乱要因パラメータの範囲を以下に示す。

現象パラメータ	原理パラメータ	寄与する外乱要因	外乱要因パラメータ	外乱要因パラメータ範囲	考え方
ピーク強度比 I_D/I_U	鉛直方位角 θ_D, θ_U (変化するパラメータ)	路面の勾配変化	縦断勾配の変化量	0 ~ 18 % (道路構造令第20条より、縦断勾配は -9 ~ +9 %)	いずれか1つまたは複数の要因組み合わせにより、そのセンサが取り得る最大角度までを評価範囲とする。
		カント路面	片勾配	0 ~ 10 % (道路構造令第16条より)	
			曲線半径	$\infty \sim 82$ m (道路構造令第15条より)	
		センサ軸ずれ	軸ずれ角度	0 ~ 軸ずれ自己検知作動の最小角度	
ピーク分離度 $\frac{ P_D - P_U }{(W_D + W_U)}$	物体までの距離 l_D, l_U	(外乱要因ではない)	認識対象までの距離	0 ~ 衝突回避に必要な最小距離	
			非認識対象までの距離	0 ~ 衝突回避に必要な最小距離	
	水平方位角 θ_D, θ_U	(外乱要因ではない)	認識対象の方位角	0 ~ \pm (そのセンサのFOV最大角)	
			非認識対象の方位角	0 ~ \pm (そのセンサのFOV最大角)	

E.2.3.2.3 評価シナリオ

自車が上に凸の勾配変化を有する道路を走行し、勾配変化部分の先に設置された金属製の標識看板付近にある認識対象物へ接近する。



※路面よりも金属製の上方構造物からの反射強度のほうが大きくなる可能性が高いため、上に凸の勾配変化がある場合を代表シナリオに選定した。

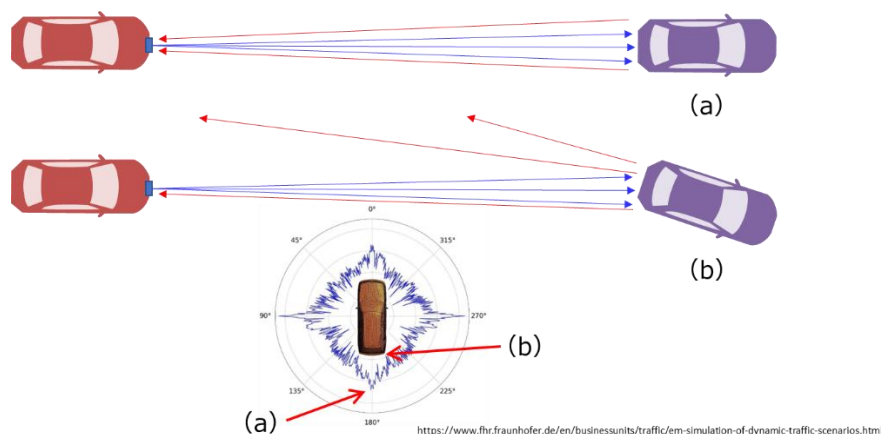
	パラメータ	パラメータ範囲	考え方
外乱要因	縦断勾配の変化	変化 0 ~ 18 %相当	上に凸な路面で代表させる
外乱要因以外	認識対象までの距離 初期値 l_D	固定 衝突回避に必要な距離	
	変曲点から認識対象までの距離 l'	変化 0 ~ l_D	
	認識対象の横位置	固定 0°	同一車線上に固定
	標識までの距離 初期値 l_U	変化 $l_D - 5 \sim l_D + 5$ (m)	
	標識の横位置	変化 -3.5 ~ +3.5 (m)	隣接車線上の設置物まで想定
	標識の高さ(下端まで)	固定 4.5m(車道上方) / 1.5m(路側式)	「道路標識設置基準」より
	標識看板の寸法	固定 2.7 × 3.5 (m)	高速道路の案内標識
	標識看板の反射率	固定 (実際の標識看板の測定値)	
	相対車速	固定 ODD内の最高車速	
	認識対象の種類	固定 乗用車 / 歩行者	交通参加者の代表 / 低反射率

E.2.4【ミリ波レーダ】低 S/N（車両の向き）

E.2.4.1 現象と原理

E.2.4.1.1 現象

レーダから照射された電磁波は、認識対象物の投影面積・反射率・表面の向きに依存してその反射強度が決まり、その一部がレーダの方向へ戻ってくる。同一の車両であっても、車両の向きが変化すると反射強度が著しく低下し、FOV（視野範囲）内に存在していても検出できなくなる場合がある。



E.2.4.1.2 原理

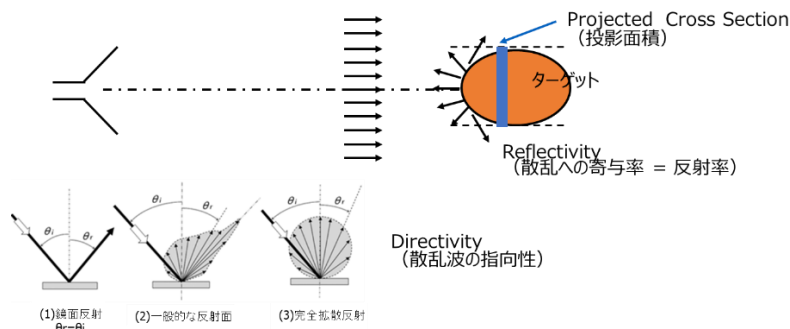
レーダで認識対象物からの反射波を受信する際に、受信信号(S)の強度は以下の方程式で求められる受信電力(P_r)に依存する。

$$P_r = \frac{\lambda^2 \cdot P_t \cdot G_t(\theta) \cdot G_r(\theta) \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot R^4}$$

ここで、 P_t は送信電力、 $G_t(\theta)$ は送信アンテナの利得、 $G_r(\theta)$ は受信アンテナの利得、 σ は対象物の反射断面積、 λ は波長、 R は認識対象物との距離を表す。

反射断面積 σ は、(a)対象物の投影面積、(b)散乱への寄与率、(c)散乱波の指向性の積で表すことができ、同じ材質の物体であればレーダと対向している箇所ほど反射強度が大きくなる。なお、散乱への寄与率(=反射率) η は、金属では $\eta \approx 1$ 、非金属では $0 \leq \eta < 1$ となる。

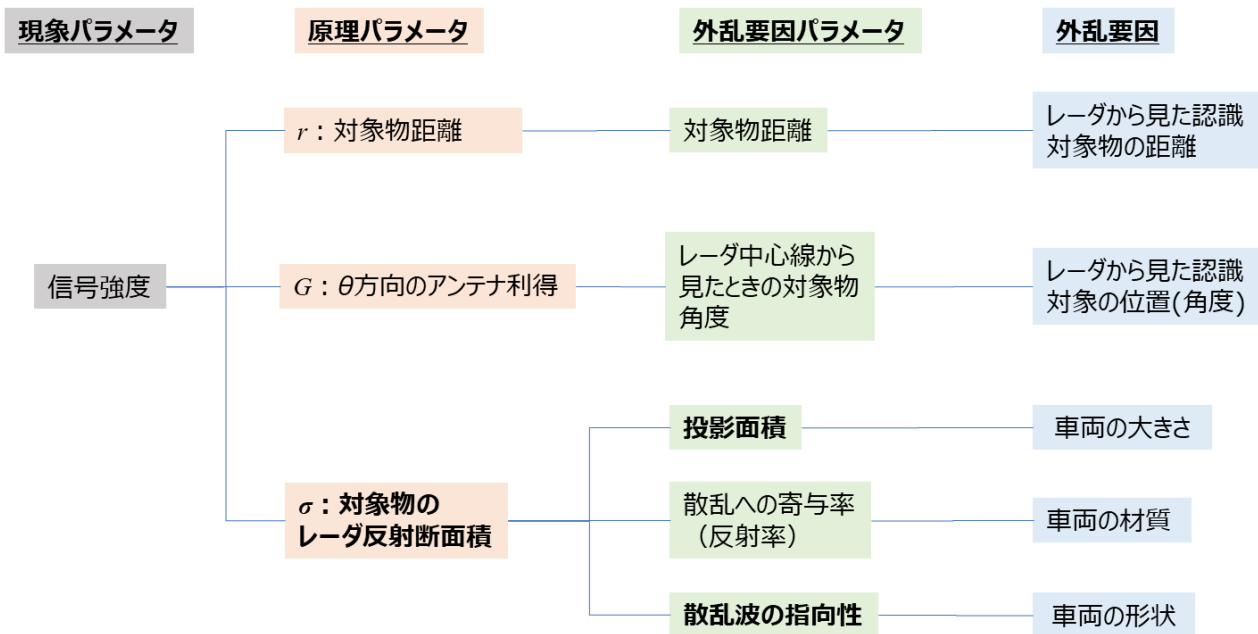
レーダ反射断面積 σ = Projected Cross Section × Reflectivity × Directivity (m^2)



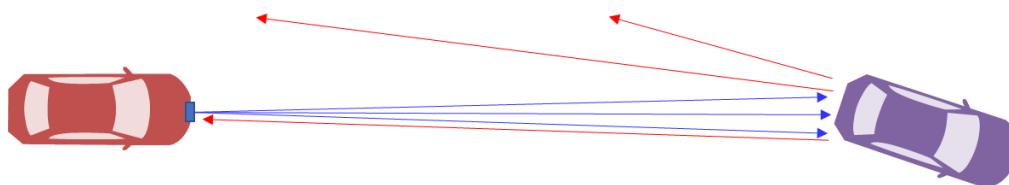
E.2.4.2 認識外乱の原理と外乱要因との関係

E.2.4.2.1 原理に基づく外乱要因

現象パラメータ、原理パラメータ、外乱要因パラメータの関係は、以下のようになる。



認識対象物の大きさ・材質・形状が同一であっても、自車との相対的角度の違いにより投影面積、散乱への寄与率および散乱波の指向性が変化する。したがって、これらが外乱要因パラメータとなる。

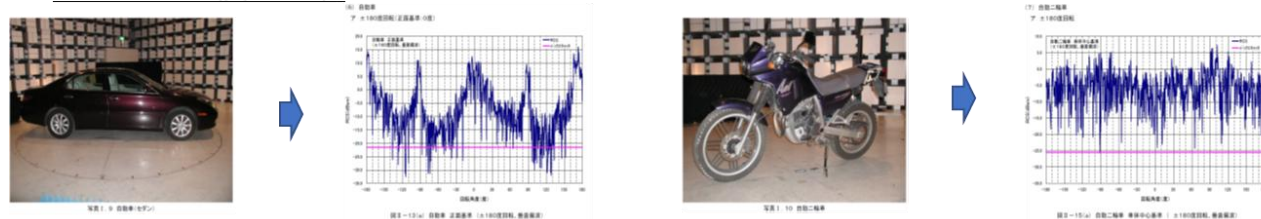


現象パラメータ	原理パラメータ	外乱要因パラメータ	原理パラメータの変化に寄与する外乱要因		
			①認識対象	②周辺環境	③車両・センサ
信号強度	レーダ反射断面積	投影面積	車両の大きさ	—	—
		散乱への寄与率 (反射率)	車両の材質	—	—
		散乱波の指向性	車両の形状	—	—

E.2.4.2.2 パラメータ範囲

車両のような複雑形状の認識対象物の場合、投影面積・反射率・指向性が複雑に相互作用するため、単一の理論モデルで反射特性を一意に表すことは困難である。そのため、本検討では先行研究などの知見を基に、反射断面積(σ)について大・中・小の3条件を代表値として選定した。

先行研究事例（実測結果）



出典）車両周辺障害物の電波反射特性に関する調査研究報告書（H16 JARI）



σ：大



σ：中



σ：小

現象パラメータ	原理パラメータ	外乱要因パラメータ	外乱要因	パラメータの範囲	考え方
信号強度	レーダ反射断面積	投影面積	車両の大きさ	代表3車種	世の中に存在する車両の大きさを代表3車種で規定
		散乱への寄与率（反射率）	車両の材質	↑	世の中に存在する車両の材質を代表3車種で規定
		散乱波の指向性	車両の形状	↑	世の中に存在する車両の形状を代表3車種で規定

E.2.4.2.3 評価シナリオ

直線路において、自転車線前方の認識対象物（静止車両）に一定速で接近する。



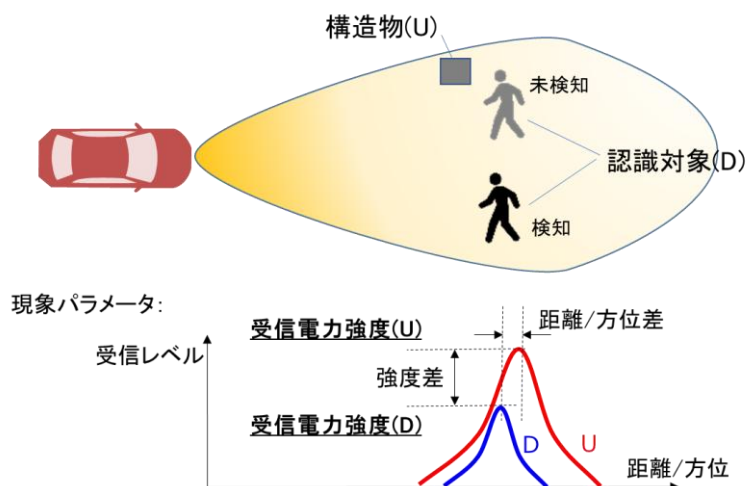
パラメータ項目	変化／固定	範囲	説明
対象物の種類	変化	・投影面積（大、中、小） ・散乱への寄与率＝反射率（金属多用、非金属多用、中間） ・散乱波の指向性（一様、偏りあり）	・面積は大まかに3水準とする ・内部まで全て非金属の車両は無く、3水準 ・車両の微小部位における法線ベクトルの密度に依存し3水準
対象物の向き	変化	0°～30°	道路線形（カーブR）に準ずる
対象物までの距離	変化	150～5m	
相対車速	固定	20kph 以下（定速）	

E.2.5 【ミリ波レーダ】低 D/U （構造物）

E.2.5.1 現象と原理

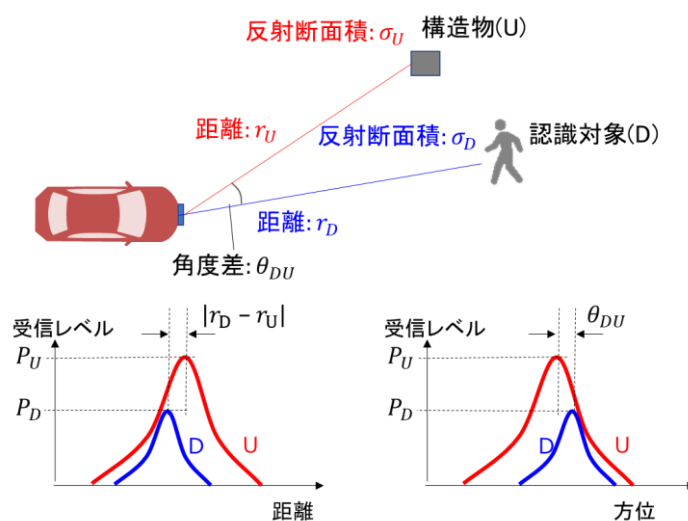
E.2.5.1.1 現象

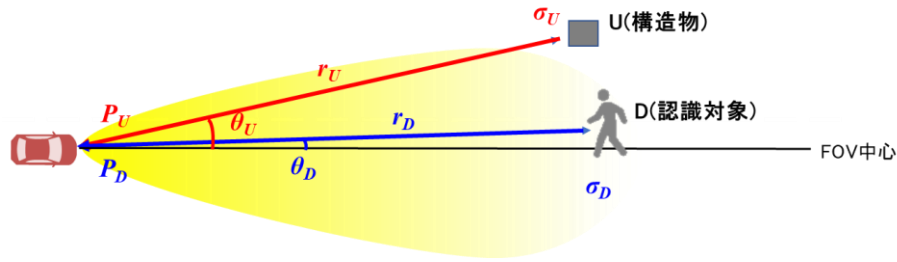
路側構造物などからの不要信号 (U: Undesired Signal) によって、近傍に存在する人など反射強度の小さい認識対象物 (D: Desired Signal) が埋もれ、False Negative (未検知) が発生する。



E.2.5.1.2 原理

認識対象物からの信号 (D) レベルよりも、構造物からの不要信号 (U) レベルが高い場合、距離および方位のいずれにおいても D が U に埋没し、未検出となる。この現象は、センサ FOV (視野範囲) 内で強い反射源 (ガードレール・壁面・標識など) が認識対象物の近傍に存在する場合に発生しやすい。不要信号 U の振幅が認識対象物からの信号 D を上回ると、両者のピークが重なり、距離・方位のいずれの次元においても識別不可能となる。





認識対象物からの信号 D および構造物からの信号 U の受信電力は、以下のように記述できる。

認識対象からの受信電力強度：

$$P_D = \frac{\lambda^2 \{G(\theta_D)\}^2 P_t}{(4\pi)^3 r_D^4} \sigma_D$$

構造物からの受信電力強度：

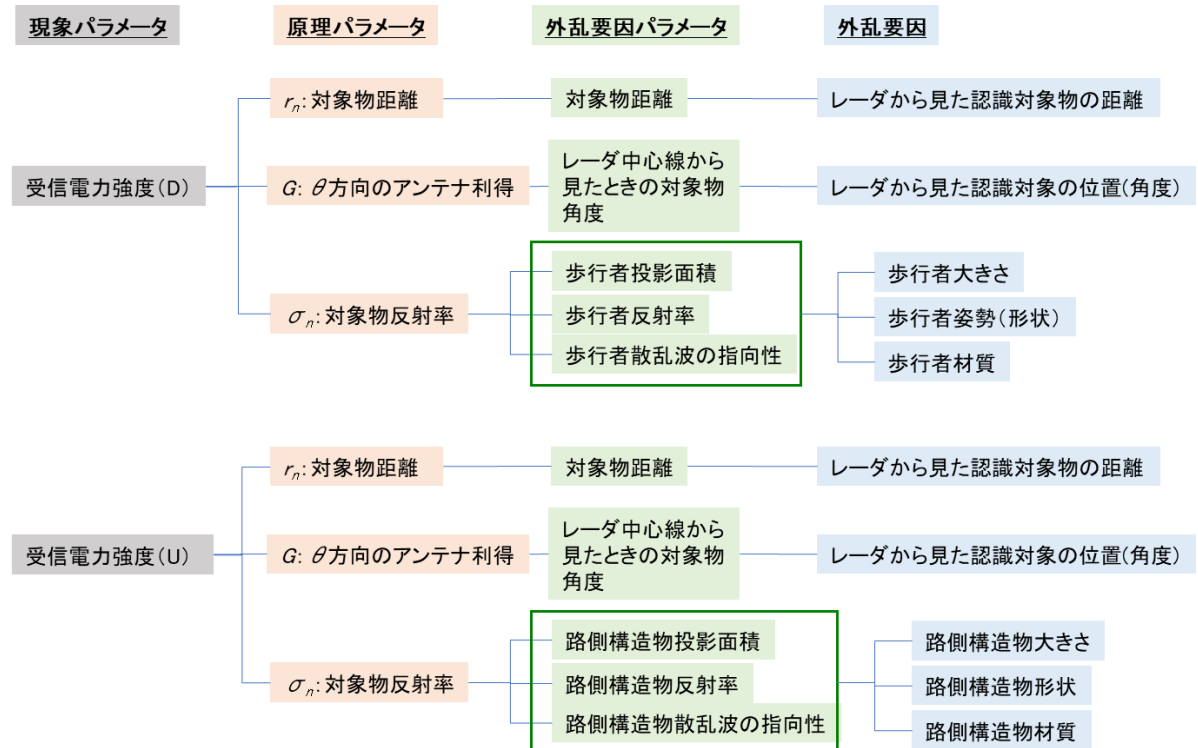
$$P_U = \frac{\lambda^2 \{G(\theta_U)\}^2 P_t}{(4\pi)^3 r_U^4} \sigma_U$$

P_t : 送信電波の電力
 λ : 電波の波長
 $G(\theta)$: アンテナ利得

E.2.5.2 認識外乱の原理と外乱要因との関係

E.2.5.2.1 原理に基づく外乱要因

現象パラメータ、原理パラメータ、外乱要因パラメータの関係は以下になる。



認識対象物(歩行者)からの信号 D について:

現象パラメータ	原理パラメータ	外乱要因パラメータ	原理パラメータの変化に寄与する外乱要因		
			①認識対象	②周辺環境	③車両・センサ
受信電力強度	認識対象距離	—	—	—	—
	アンテナ利得	対象物角度	位置	—	—
	対象物反射率 RCS値(σ_n)	投影面積	大きさ	—	—
		反射率	材質	—	—
		散乱波の指向性	形状	—	—
			姿勢	—	—

路側構造物からの信号 U について:

現象パラメータ	原理パラメータ	外乱要因パラメータ	原理パラメータの変化に寄与する外乱要因		
			①認識対象	②周辺環境	③車両・センサ
受信電力強度	認識対象距離	—	—	—	—
	アンテナ利得	対象物角度	—	位置	—
	対象物反射率 RCS値(σ_n)	投影面積	—	大きさ	—
		反射率	—	材質	—
		散乱波の指向性	—	形状	—
			—	姿勢	—

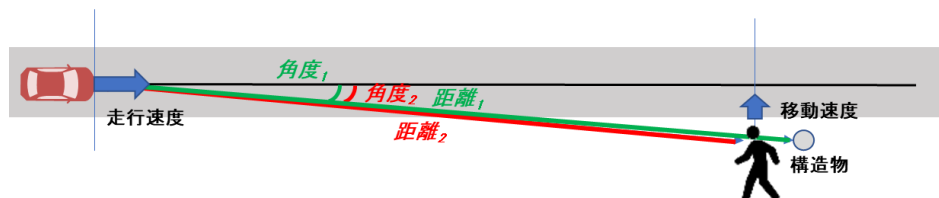
E.2.5.2.2 パラメータ範囲

現象パラメータ、原理パラメータ、外乱要因パラメータの範囲を以下に示す。

現象パラメータ	原理パラメータ	外乱要因パラメータ	外乱要因	パラメータの範囲	考え方
受信電力強度	認識対象距離	←	←	対象物距離(r_n)最小検知距離～最大検知距離	レーダの知覚部分を評価するために距離はレーダのスペックに基づく範囲で検証
	アンテナ利得	対象物角度	位置	対象物角度(θ_n)FOVの範囲内	レーダのスペックに基づきFOV内でパラメータを振り検証
	対象物反射率 RCS値(σ_n)	投影面積	大きさ	歩行者: 大人は平均的な体型、子供小学校低学年平均 路側構造物: 円柱の直径が50mm～300mm程度	歩行者: 平均的な形状と小さめの形状を想定 路側構造物: 電柱、街路灯支柱などを想定
		反射率	材質	歩行者: 誘電体(人体) 路側構造物: 金属、コンクリート	ミリ波帯の物性値データベースが必要
		散乱波の指向性	形状	歩行者: 大人は平均的な体型、子供は小学校低学年平均 路側構造物: 円柱形状	歩行者: 平均的体型 路側構造物: 見かけ上の角度に関わらず反射強度が高い形状
			姿勢	歩行者: 歩行姿勢 路側構造物: 垂直	歩行者: 横断姿勢 路側構造物: 正しく設置されていることを想定

E.2.5.2.3 評価シナリオ

路側構造物（電柱など）が走行路脇に存在する道路環境において、自車が車線中央を走行中に歩行者が自車進行路を横断する。路側構造物は歩行者の後方にある。



パラメータの項目	範囲		説明
認識対象までの距離	変化	最小検知距離～最大検知距離	センサーの最小検知距離から最大検知距離の範囲で距離を変化させ評価
認識対象までの角度	変化	FOVの範囲内	レーダのFOV範囲内角度を変化させ評価
認識対象	変化	大人、子供	平均的体型の大人、子供
自車走行速度	固定	ODDで指定されている最大速度	
認識対象移動速度	変化	5km/h～8km/h	認識対象の移動速度を5～8km/hの範囲で変化させて評価

E.3 LiDAR の原理モデルと評価シナリオ

LiDAR については、例として下記3つの認識外乱の発生原理について原理モデルと評価シナリオを記述する。

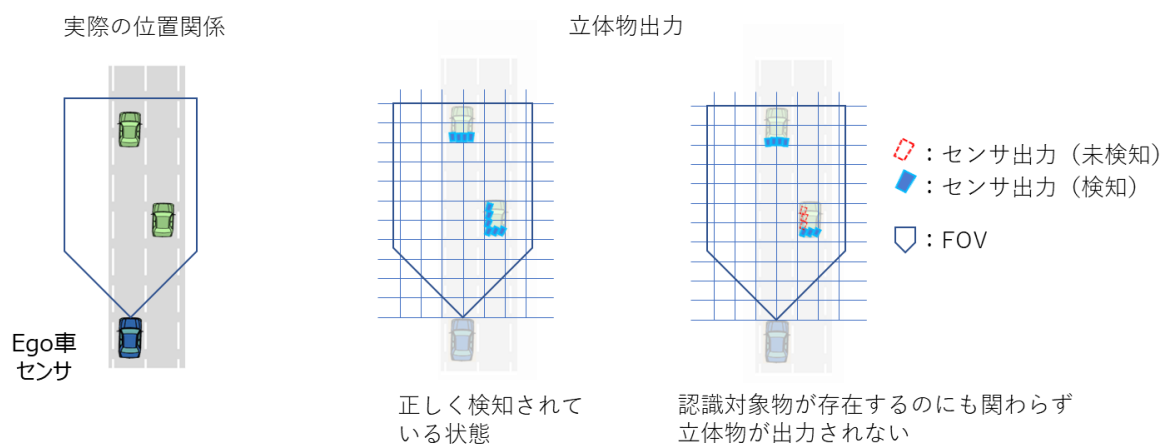
- 信号減衰（認識対象物）
- ノイズ
- 認識対象外からの信号（雨滴での反射）

E.3.1 【LiDAR】信号減衰（認識対象物）

E.3.1.1 現象と原理

E.3.1.1.1 現象

ある認識対象物がセンサ FOV 内に入っているにもかかわらず、認識対象に付帯した反射点が持続的に点群として出力されず、False Negative (未検知) が発生する。

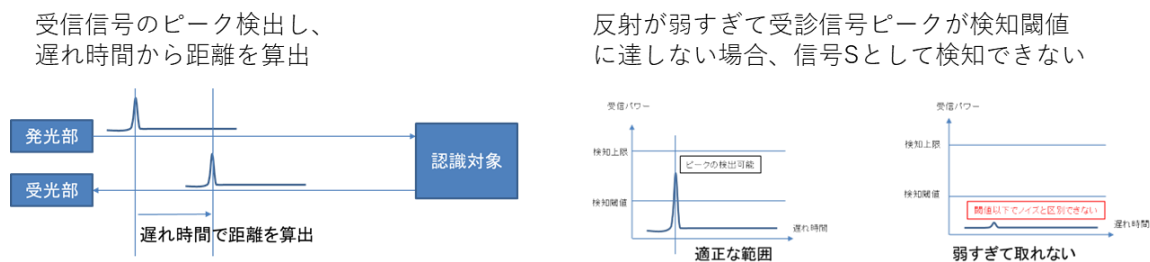


下図は、信号減衰の種類と現象とを整理したものである。本章では評価条件として最も厳しくなる、下図の赤枠で囲んだ現象を取り上げる。

		A		B		C	
		1	2	1	2	1	2
現象パラメータ	減衰の量	あるべき反射点が点群として出力されない					
	減衰の範囲	画角内の全範囲 		認識対象に付帯 		画角に付帯 	
	減衰の継続時間	持続的 	一時的 	持続的 	一時的 	持続的 	一時的
現象モード		認識対象に限ったS減衰のため、FOV全体ではない。		認識対象に付帯した反射点が、持続的に点群として出力されない状態が続く ⇒ 立体物として出力されない 未検知 検知		一時的な不調より持続したほうが、より厳しいため、そちらで代表する。	
						認識対象に限ったS減衰のため、認識対象以外の範囲は考慮しない。	

E.3.1.1.2 原理

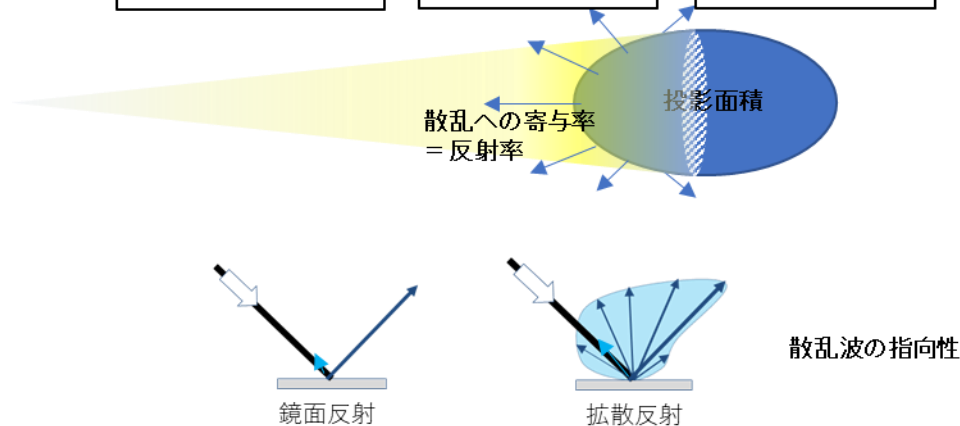
対象物からの反射が弱すぎることで、FOV 内であってもピークが検出できず、対象物を検知できない



E.3.1.1.3 原理モデル

認識対象物における反射強度は、対象物の投影面積、散乱への寄与率、および散乱波の指向性の積で表され、その特性はミリ波レーダと同等の原理に基づく。同一の表面材質をもつ物体であれば、指向性が高い、すなわち LiDAR の照射方向と法線方向に近い箇所ほど、反射強度が大きくなる。

$$\text{反射強度} = \boxed{\text{対象物の投影面積}} * \boxed{\text{散乱への寄与率}} * \boxed{\text{散乱波の指向性}}$$



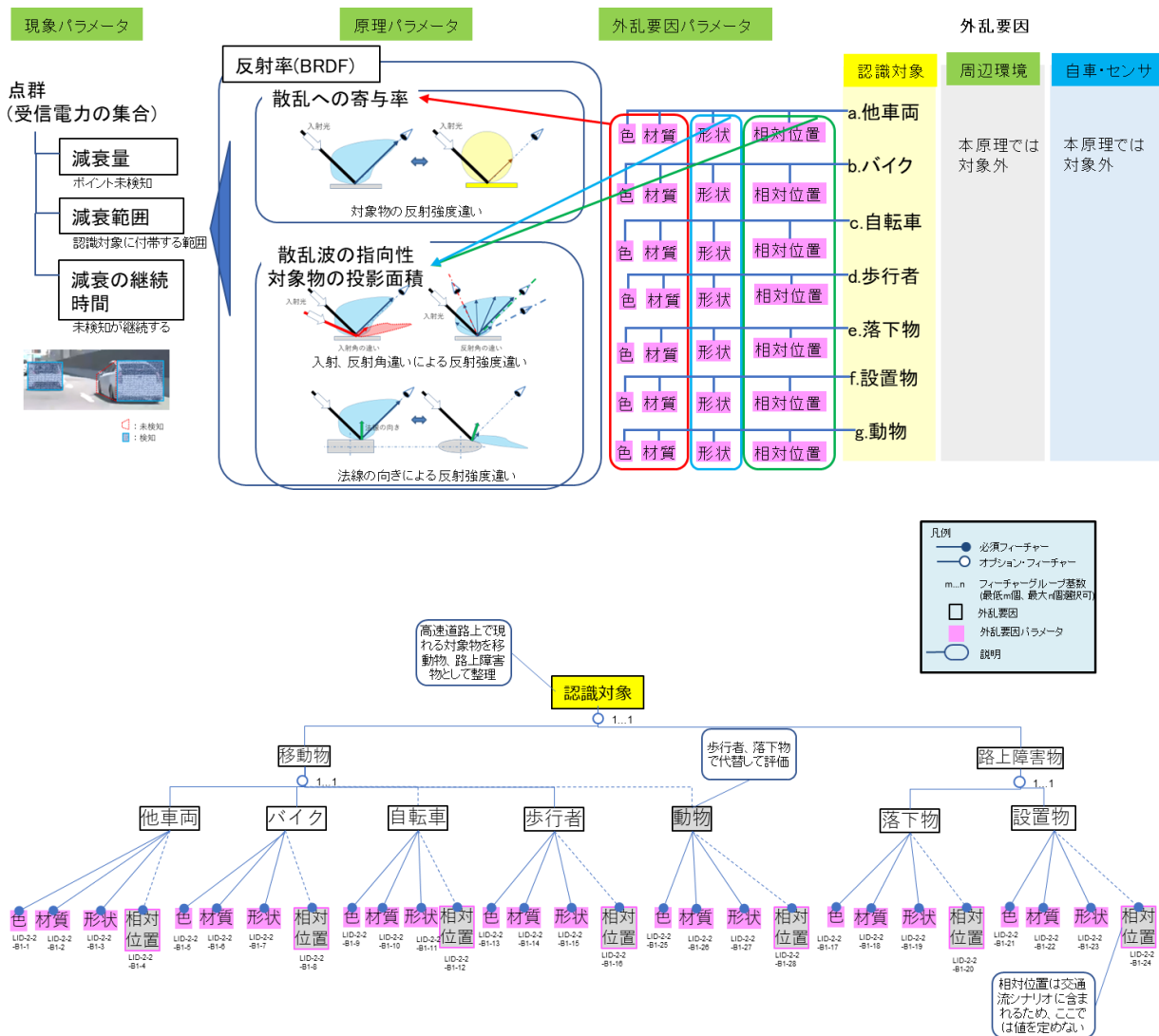
反射強度に寄与する3つの要素それぞれについて、反射強度が変化する原理およびその要因を整理すると、下図のようになる。対象物の色・材質・形状・相対位置が反射強度に影響を与える要因、すなわち外乱要因として挙げられる。

原理		外乱要因	
散乱への寄与率 対象物の反射強度の違い		反射強度の変化を発生させる要因としては、塗装や服装などの表面の色、材質の違いによる。 色（明度） 材質 塗装の違いによる反射変化イメージ	
散乱波の指向性 対象物の投影面積		入射角、反射角の違いで、反射強度の変化を発生させる要因は、塗装や服装などの表面の色、材質の違いによる。 色（明度） 材質 角度の違いによる反射率変化イメージ	入射角、観察点の変化を発生させる要因としては、自動車と対象物の位置関係による。 相対位置
法線方向の違いによる反射強度の違い		入射角、反射角の違いで、反射強度の変化を発生させる要因は、塗装や服装などの表面の色、材質の違いによる。 色（明度） 材質 形状の違いによる反射率変化イメージ	対象物表面の法線の向きを変化させる要因としては、対象物の形状による。 形状 車種による形状の違い

E.3.1.2 認識外乱の原理と外乱要因との関係

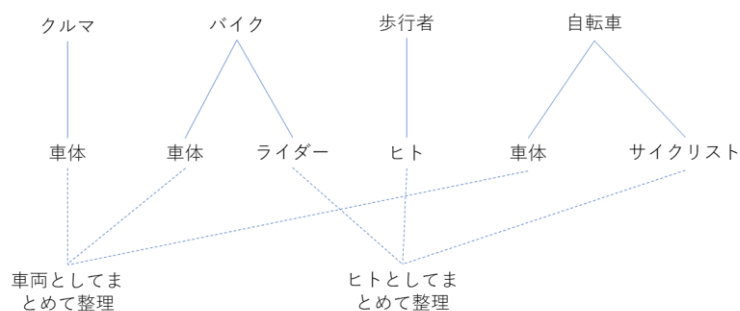
E.3.1.2.1 原理に基づく外乱要因

現象パラメータ、原理パラメータ、外乱要因パラメータの関係は以下になる。本原理についての認識外乱の評価では、認識対象物の組み合わせは考慮しない(認識対象物の組み合わせにより起こる False Negative は、別の認識外乱原理として取り扱う)。

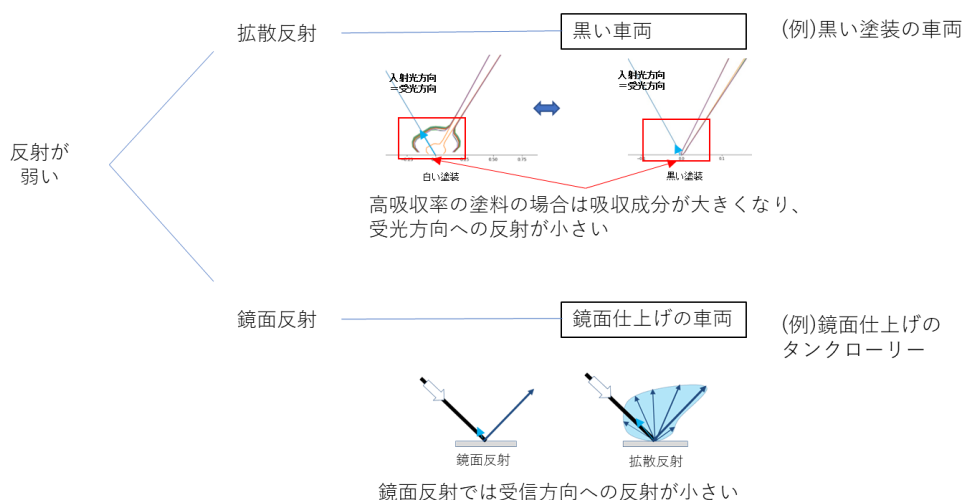


E.3.1.2.2 パラメータ範囲

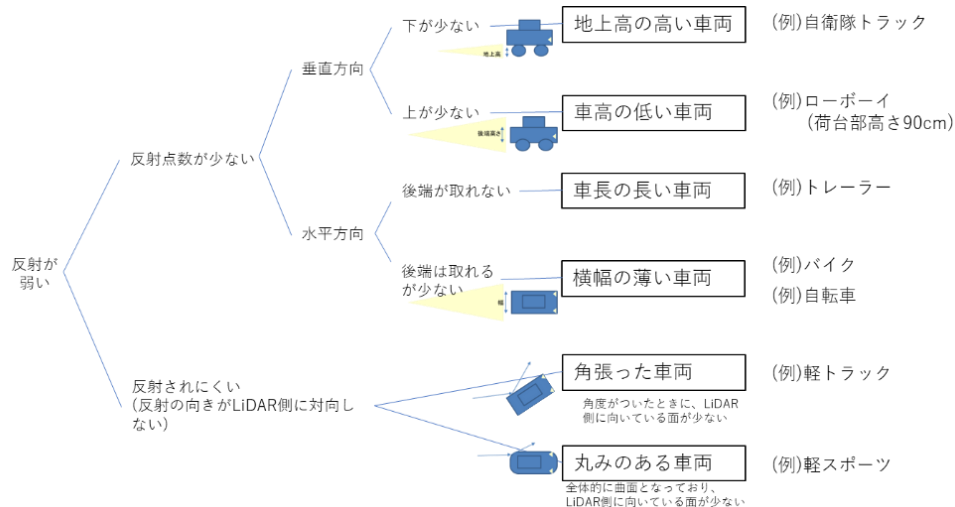
パラメータ範囲を検討するにあたり、認識対象物は車両とヒトとに分けて整理する。



車両の色・材質は、表面塗装の反射特性で考える。より厳しい評価条件として、拡散反射が小さい黒い車両および受信方向への反射が小さい鏡面仕上げの車両を選択する。

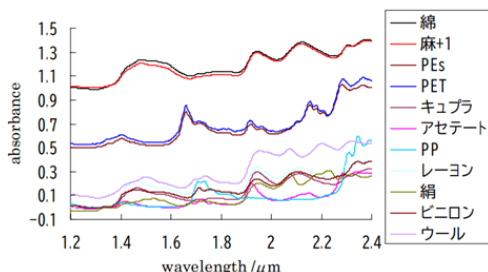


車両形状は、LiDAR 送信波の当たり方で考える。より厳しい評価条件として、送信波の当たる点数が少ない形状と、反射されにくい形状とを選択する。



認識対象物がヒトである場合、歩行者、ライダー(二輪車)、サイクリスト(自転車)などの場合、服装、荷物、肌や髪の色、ヘルメット装着などの違いにより反射強度は異なる。
 ここでは反射面積として占める割合の高い、服装の反射強度の違いからパラメータ範囲を決定する。服装の素材は植物由来(綿)、動物由来(革)、人工物(化繊、反射材)から選出する。

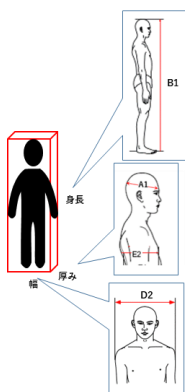
近赤外線の反射が素材により異なる例



ヒトの形状は、身体の大きさと姿勢の違いを考える。より厳しい評価条件として、比較的小柄な日本人の体格を最悪値として扱う。

①大きさ(立位)の違い

歩行者の大きさの示し方として、人体を囲む枠で表現する。
 身長、幅、厚みはそれぞれ身長(B1)、肩幅(D2)、胸部厚径(E2)に対応。



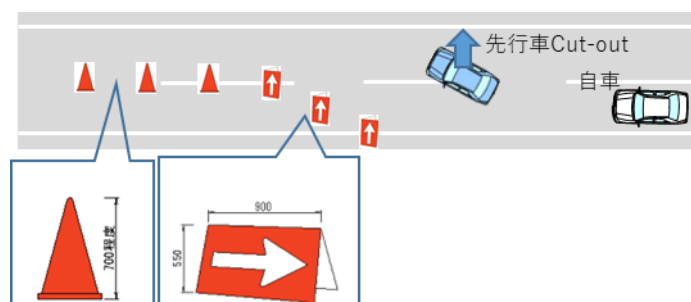
立位	日本人成人男性平均 身長(B1) : 171.4cm 肩幅(D2) : 45.6cm 胸部厚径(E2) : 21.1cm <small>※産業技術総合研究所 デジタルヒューマン研究センター AIST人体寸法データベース1991-1992</small>
	日本人成人女性平均 身長(B1) : 159.1cm 肩幅(D2) : 40.7cm 胸部厚径(E2) : 21.1cm <small>※産業技術総合研究所 デジタルヒューマン研究センター AIST人体寸法データベース1991-1992</small>
	日本人3歳男児平均 身長(B1) : 95.1cm 肩幅(D2) : 胸部厚径(E2) : <small>※厚生労働省 平成22年調査</small>

②姿勢の違い

姿勢の変化により、路面からの高さが変化。
 姿勢についてパラメータとして考慮する。

座位	座高(I1) 日本人成人男性平均 : 92.6cm 日本人成人女性平均 : 86.7cm <small>※産業技術総合研究所 デジタルヒューマン研究センター AIST人体寸法データベース1991-1992</small>
臥位	頭長(A1) 日本人成人男性平均 : 18.9cm 日本人成人女性平均 : 18.0cm、 胸部厚径(E2) 日本人成人男性平均 : 21.1cm 日本人成人女性平均 : 21.1cm <small>※産業技術総合研究所 デジタルヒューマン研究センター AIST人体寸法データベース1991-1992</small>
乗車姿勢	バイクや自転車の乗車姿勢は、停止した時に足をつけて立つ形になるため、立位と同等の高さと考ええる。

認識対象が路上の設置物の場合、車線の区切りとして用いられる矢印板とセーフティーコーンを評価対象とする。



認識対象が路上の落下物の場合、落下物件数で上位となる自動車部品のタイヤを評価対象とする。

参考)種類の抽出について、NEXCO 中日本調べのランキング

- 1 位 プラスチック・ビニール・布類(毛布、シートなど):2 万 5400 件
⇒高さがない、踏んでも影響小
- 2 位 自動車部品類(タイヤ、自動車付属品など):8900 件
⇒15cm 以上のものあり、金属などの固いものあり
- 3 位 木材類(角材、ベニヤなど):6900 件
⇒角材は 15cm 以上のものあり、固い。次ステップで検討。
- 4 位 ロードキル(動物の死骸):6900 件
⇒日本ではたぬきなどの小動物が多いと思われる。
- その他:1 万 7400 件

ここまでの内容からパラメータ範囲を一覧として整理すると、以下のようになる。

原理パラメータ	外乱要因	外乱要因パラメータ	パラメータ範囲	考え方
反射率(BRDF)	車両	形状	地上高の高い車両 車高の低い車両 バイク、自転車 角張った車両 丸みのある車両	ボデー下をすり抜け、タイヤからのみ反射 荷台部分は上レイヤーのビームが当たりづらい 水平方向の反射点数が少ない 向きによって法線の向きがLiDARと正対しづらい 法線の向きがLiDARと正対しづらい
		色、材質	黒い塗装 鏡面反射	拡散反射成分が少ない 向きによって鏡面反射して返ってこない
	歩行者	形状	大、小 立位、座位、臥位	体格、体位のバリエーションで評価
		色、材質	黒い革製の衣服	衣服の中でも、特に反射が弱いものと推測
	設置物	形状	三角コーン、矢印板	車線の区切りとして道路上に現れる
		色、材質	上記設置物に付随した色、材質	バリエーション違いの差は小さいと推測。優先度低
	落下物	形状	タイヤ 木材	低背、法線の向きがLiDARと正対しづらい 低背、向きによって法線の向きがLiDARと正対しづらい
		色、材質	上記落下物に付随した色、材質	バリエーション違いの差は小さいと推測。優先度低

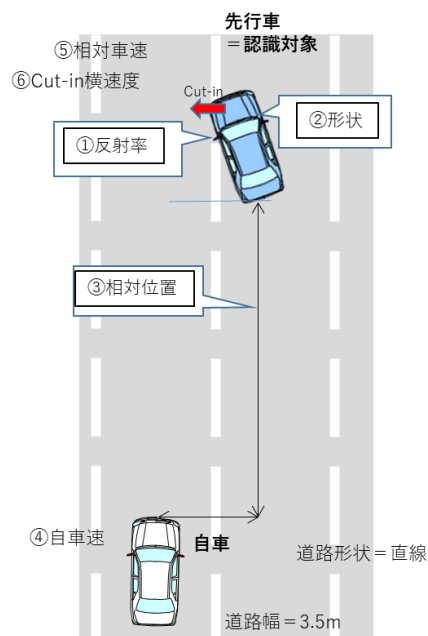
E.3.1.2.3 評価シナリオ

シナリオ F-1: 直線路での Cut-in シナリオ

Cut-in 車両を認識対象物として設定し、その反射率および形状を変化させながら評価する。

【パラメータ】

外乱要因パラメータ	①反射率(指向性)	塗装材=黒、鏡面
	②形状	車両=例)自衛隊トラック、ローボイ、トレーラー、バイク、軽トラック、軽スポーツ
	③相対位置	(交通流シナリオにて定義される範囲)
評価に必要な その他パラメータ	④自車速	ODD内の最大車速
	⑤相対車速	(交通流シナリオにて定義される範囲)
	⑥Cut-in横速度	

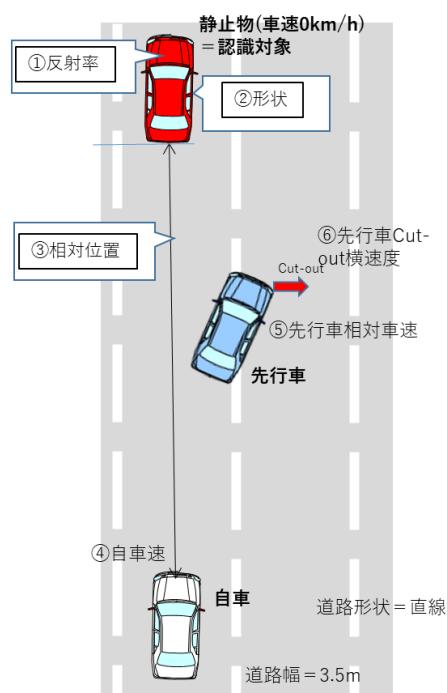


シナリオ F-2: 直線路での Cut-out シナリオ

先行車が Cut-out した前方の走行路上に静止した認識対象物を配置し、その反射率および形状を変化させながら評価する

【パラメータ】

外乱要因パラメータ	①反射率(指向性)	車両: 塗装材=黒、鏡面 ヒト: 服装=革、化繊、綿、反射材 設置物、落下物: 対象物各々の反射率
	②形状	車両=例)自衛隊トラック、ローボイ、トレーラー、バイク、軽トラック、軽スポーツ ヒト=立位、座位、臥位、交通誘導員、自転車 設置物=セーフティコーン、矢印板 落下物=タイヤ、木材
	③相対位置	(交通流シナリオにて定義される範囲)
評価に必要な その他パラメータ	④自車速	ODD内の最大車速
	⑤先行車相対車速	(交通流シナリオにて定義される範囲)
	⑥先行車Cut-out横速度	

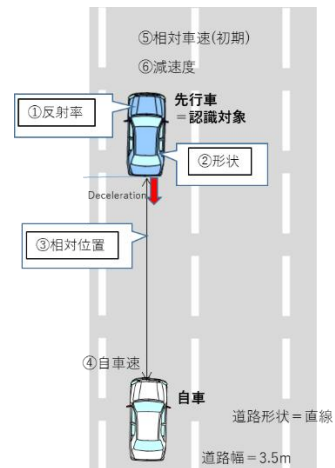


シナリオ F-3: 直線路での Deceleration シナリオ

減速車両を認識対象物として設定し、その反射率および形状を変化させながら評価する。

【パラメータ】

外乱要因パラメータ	①反射率(指向性)	塗装材=黒、鏡面
	②形状	車両=例)自衛隊トラック、ローボイ、トレーラー、バイク、軽トラック、軽スポーツ
	③相対位置	(交通流シナリオにて定義される範囲)
評価に必要な その他パラメータ	④自車速	ODD内の最大車速
	⑤相対車速(初期)	(交通流シナリオにて定義される範囲)
	⑥減速度	

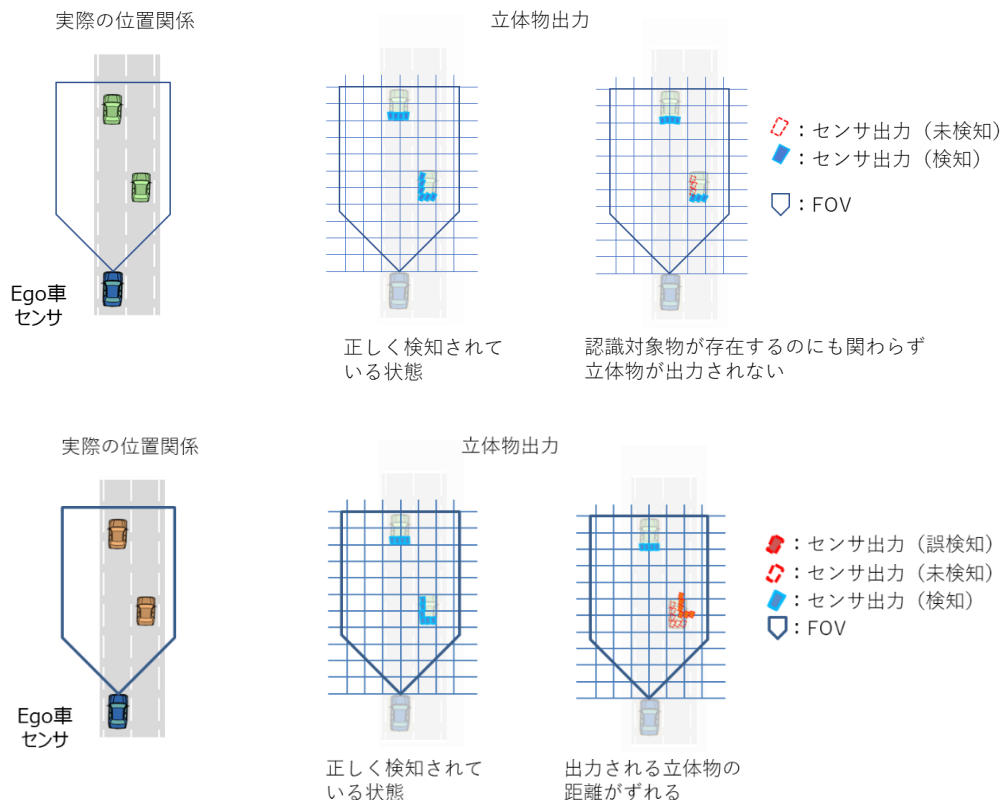


E.3.2 【LiDAR】ノイズ

E.3.2.1 現象と原理

E.3.2.1.1 現象

ある認識対象物がセンサ FOV 内に入っているにも関わらず、認識対象に付帯した反射点が持続的に点群として出力されず、False Negative (未検知)が発生する場合と、実際の対象物の位置からずれたところに出力されてしまう False Positive (誤検知)が発生する場合とがある。

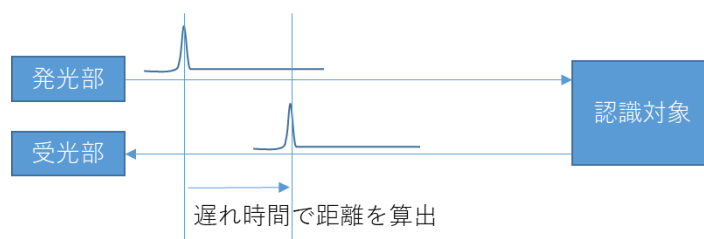


下図は、ノイズの範囲と現象とを整理したものである。本章では評価条件としてより厳しくなる、持続的なノイズを取り上げる。

		A		B		C	
		1	2	1	2	1	2
現象/パラメータ	ノイズの量	ノイズによりあるべき反射点が点群として出力されない					
	ノイズの範囲	画角内の全範囲 		認識対象に付帯 		画角に付帯 	
	ノイズの継続時間	持続的 	一時的 	持続的 	一時的 	持続的 	一時的
現象モード				太陽光が前方車両(認識対象)に反射し、持続的にノイズが入ってくる状態 	← 一時的なノイズよりも持続的なもののほうが条件が厳しいため、左記で代表する	太陽からの直接光が入射し、持続的にノイズが入ってくる状態 	← 対向車に搭載されたライトやLiDARがノイズとなる可能性があるが、一時的であるため、より厳しい持続状態で代表する

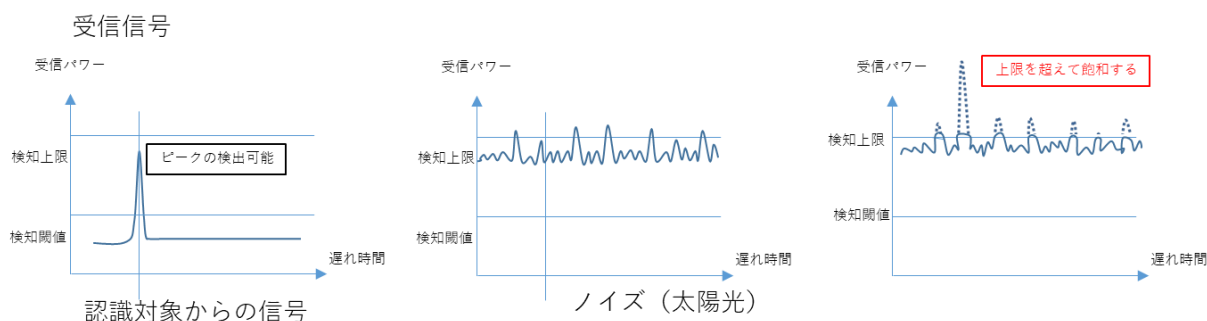
E.3.2.1.2 原理

LiDAR では、反射光の受信信号のピークを検出して遅れ時間を算出し、対象物までの距離を求めている。



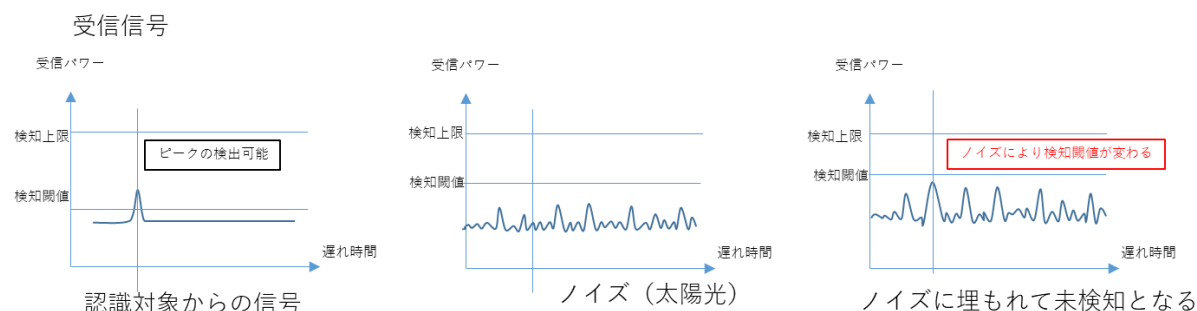
【飽和する場合】

太陽光のような定常的に照射される赤外光が受信部にノイズとして入力すると、そのノイズ成分と認識対象物からの反射信号が加算されて受信素子が飽和する。



【ノイズに埋もれる場合】

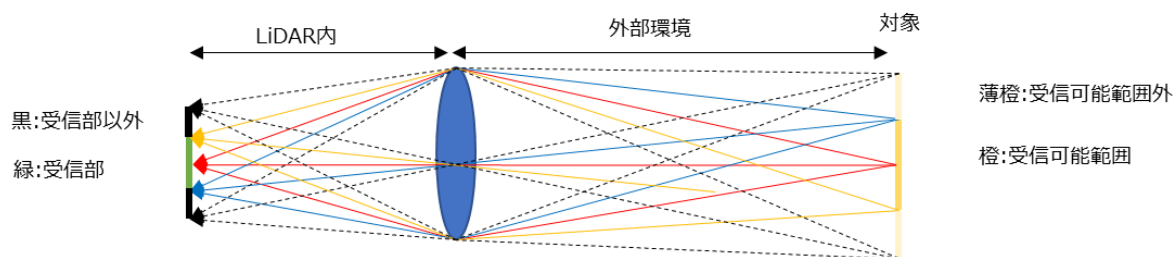
太陽光のような定常的に照射される赤外光が受信部にノイズとして入ると、反射強度の弱い認識対象物からの反射波がそのノイズに埋もれる。



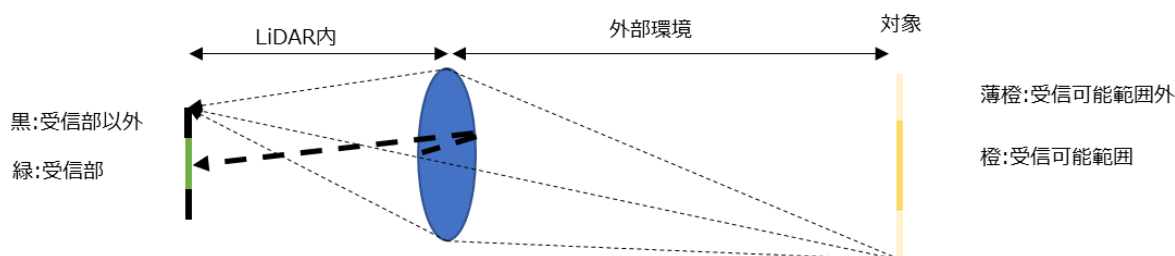
また、ノイズは外乱光によるものと内部反射によるものの2種類がある。

外乱光は、受信可能範囲内でレンズを通過するが、LiDAR は① 自身が送信した光の散乱光、② 他光源 (例: 太陽光や他車両の LiDAR など) による散乱光、③ 範囲内の自発光 (環境光) を光学的に区別することができず、これらはすべて同一の光路を通過して受信部に到達する。

※上記①以外の光は全てノイズ成分となる。(LiDAR では自身が送信する波長が既知のため、その波長範囲以外の光はカットするフィルタが通常用いられる。ノイズ成分となる光は、LiDAR の送信に使われる波長範囲内の成分である)

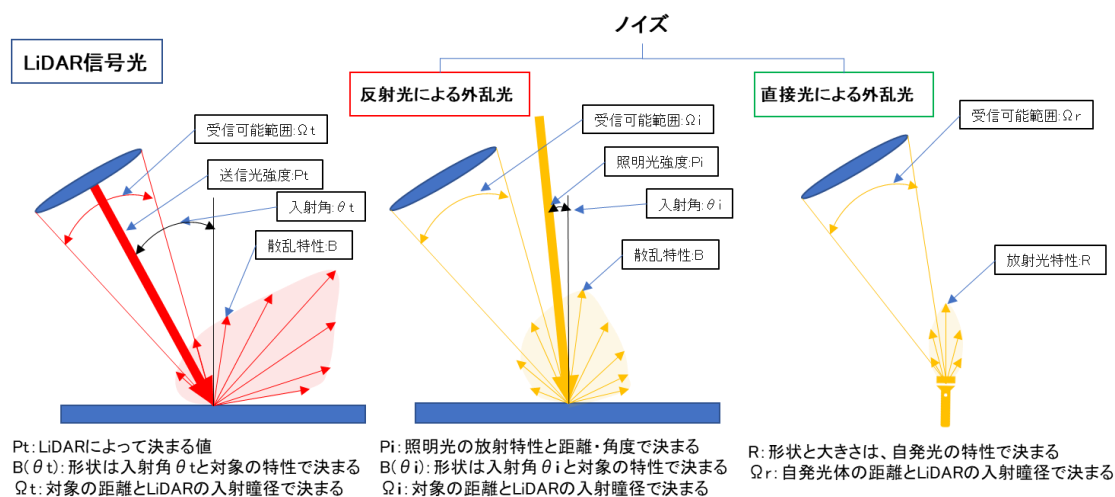


一方、受信可能範囲外から入射した光は、通常は受信部以外の方向へ導かれるため受信されることはないが、内部反射などが生じた場合（下図の太線）、本来の受信範囲外からの光が受信部に到達してしまうことがある。通常は、反射防止膜などにより内部反射を抑制しているが、太陽光・ヘッドライト・他車両のLiDAR送信光などの強い入射光があった場合には内部反射が発生し、ゴーストを引き起こす可能性がある。ただし、内部反射によるノイズは頻度が少ないため、安全性評価における認識外乱評価シナリオとしては取扱対象外とする。



E.3.2.1.3 原理モデル

ここでは、反射光および直接光による外乱光をノイズとして取り扱う。



総受信光量 P_a は、以下のように表される。

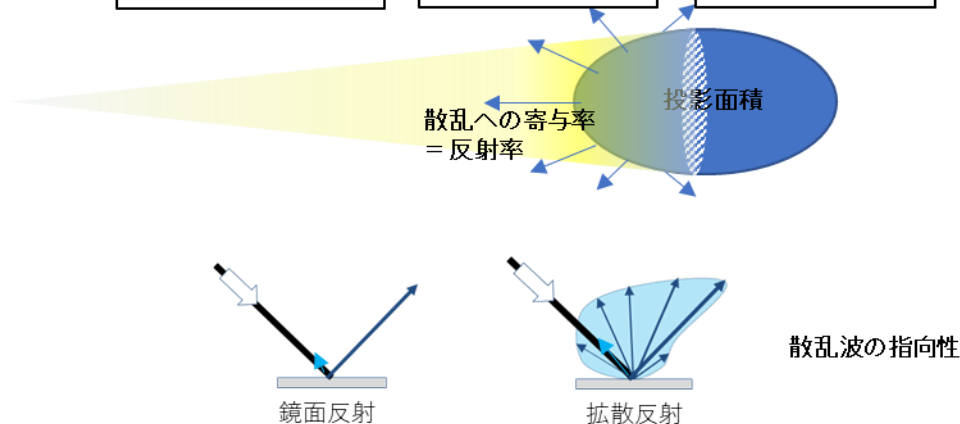
$$P_a = P_t \int_{\Omega_t} B(\theta_t) d\Omega + P_i \int_{\Omega_i} B(\theta_i) d\Omega + \int_{\Omega_r} R d\Omega + N$$

ノイズとして考慮するパラメータ

N : ゴーストによる受信光量

認識対象物における反射強度は、対象物の投影面積、散乱への寄与率、および散乱波の指向性の積で表され、その特性はミリ波レーダの場合と同様である。同一の表面材質をもつ物体であれば、指向性が高い、すなわち LiDAR の照射方向と法線方向が一致する箇所ほど、反射強度が大きくなる。

$$\text{反射強度} = \boxed{\text{対象物の投影面積}} * \boxed{\text{散乱への寄与率}} * \boxed{\text{散乱波の指向性}}$$



反射強度に寄与する3つの要素および外乱光の特性それぞれについて原理およびその要因を整理すると、下図のようになる。

原理		外乱要因	
反射光による外乱光 	散乱特性 散乱への寄与率 対象物の反射強度の違い	反射物の材質を変えると、入射角、観測点が同じでも反射強度が変化する	反射強度の変化を発生させる要因としては、塗装や服装などの表面の色、材質の違いがある。 色(明度) 材質 塗装の違いによる反射率変化イメージ
	散乱波の指向性 対象物の投影面積 入射角、反射角違いによる反射強度の違い	入射角を変えると反射強度が変化する 観測点を変えると反射強度が変化する	入射角、反射角違いで、反射強度の変化を発生させる要因は、塗装や服装などの表面の色、材質の違いがある。 色(明度) 材質 角度違いによる反射率変化イメージ 入射角、観測点の変化を発生させる要因としては、自車と対象の位置関係がある。 相対位置
	法線方向の違い による反射強度の違い 対象物表面の法線の向きが変わると反射強度が変化する	対象物表面の法線の向きが変わると反射強度が変化する	入射角、反射角違いで、反射強度の変化を発生させる要因は、塗装や服装などの表面の色、材質の違いがある。 色(明度) 材質 形状違いによる反射率変化イメージ 対象物表面の法線の向きを変化させる要因としては、対象物の形状がある。 形状 車種による形状違い
直接光による外乱光 	照明光強度 放射光特性	光源の強さで反射強度が変化する	光源の輝度 (cd/m²)
	照明光入射角 放射光距離	入射角を変えると反射強度が変化する	光源と認識対象物とLiDAR受光部の位置関係がある。 相対位置

E.3.2.2 認識外乱の原理と外乱要因との関係

E.3.2.2.1 原理に基づく外乱要因

現象パラメータ、原理パラメータ、外乱要因パラメータの関係は以下になる。



E.3.2.2.2 パラメータ範囲

反射光による外乱光の場合のパラメータ範囲は、以下のように設定する。

外乱要因			外乱要因 パラメータ	範囲	根拠(又は理由)
空間	光源	太陽光	高度	20 ~ 90 deg	LiDARへの反射光となり得る太陽高度全域 (参考: 夏至の日の北緯35° 付近の南中高度: 約 78 deg)
			方位	-180 ~ -150 deg , 150 ~ 180 deg	自車の後方 ±30 degとする (自車の進行方向 ≡ 0 deg)
			明るさ	20,000 ~ 120,000 lx	真夏・晴れの日、昼間の太陽明るさ: 最大120,000 lx 程度 (気象庁 日射観測データより換算)

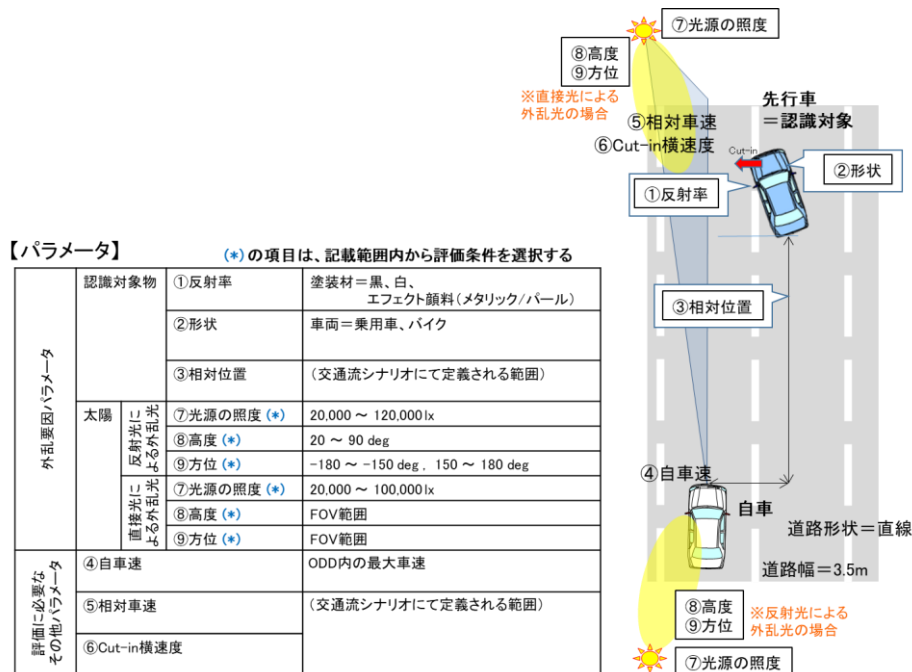
直接光による外乱光の場合のパラメータ範囲は、以下のように設定する。

外乱要因			外乱要因 パラメータ	範囲	根拠(又は理由)
空間	光源	太陽光	高度	FOV範囲	LiDARに太陽光が直接入射する範囲とする
			方位	FOV範囲	LiDARに太陽光が直接入射する範囲とする
			明るさ	20,000 ~ 100,000 lx	高度 60 deg付近までにおける太陽の明るさを想定

E.3.2.2.3 評価シナリオ

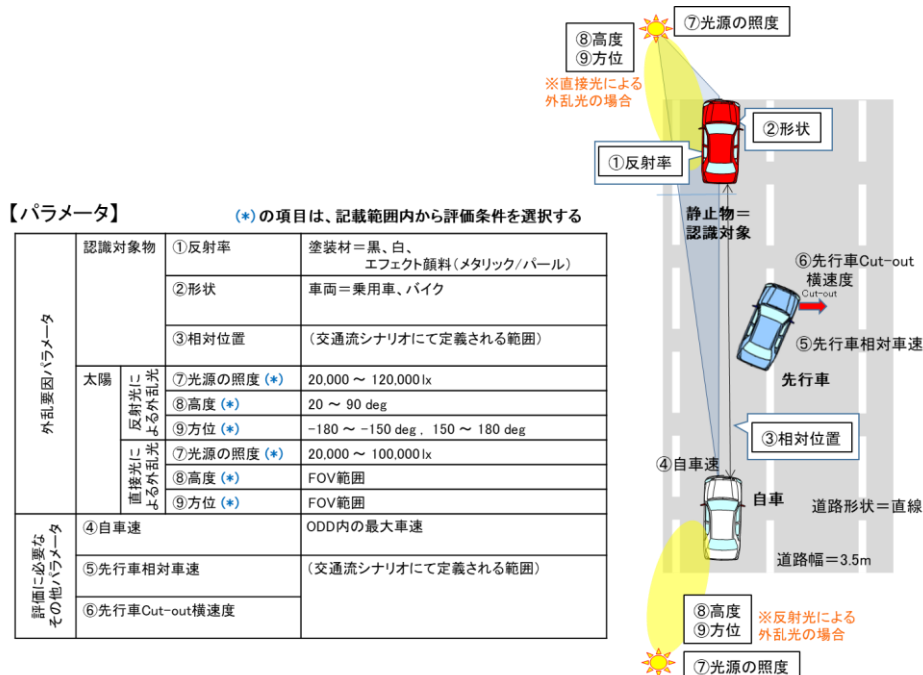
シナリオ F-1: 直線路での Cut-in シナリオ

Cut-in 車両を認識対象物として設定し、その反射率および形状、光源の条件を変化させながら、評価をする。



シナリオ F-2: 直線路での Cut-out シナリオ

先行車が Cut-out した前方の走行路上に静止した認識対象物を配置し、その反射率および形状、光源の条件を変化させながら評価する。



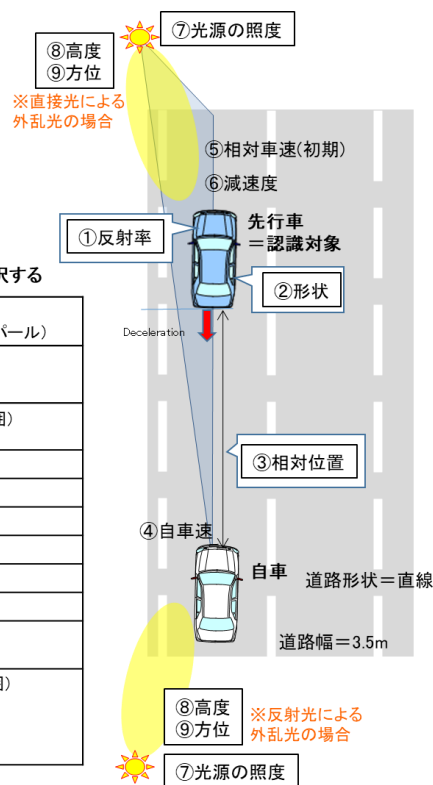
シナリオ F-3: 直線路での Deceleration シナリオ

減速車両を認識対象物として設定し、その反射率および形状、光源の条件を変化させながら評価する。

【パラメータ】

(*) の項目は、記載範囲内から評価条件を選択する

外乱要因/パラメータ	認識対象物	①反射率	塗装材=黒、白、エフェクト顔料(メタリック/パール)
		②形状	車両=乗用車、バイク
		③相対位置	(交通流シナリオにて定義される範囲)
	太陽 反射光による外乱光 直接光による外乱光	⑦光源の照度(*)	20,000 ~ 120,000 lx
		⑧高度(*)	20 ~ 90 deg
		⑨方位(*)	-180 ~ -150 deg, 150 ~ 180 deg
評価に必要な その他パラメータ	④自車速	⑦光源の照度(*)	20,000 ~ 100,000 lx
		⑧高度(*)	FOV範囲
		⑨方位(*)	FOV範囲
		⑤相対車速 (初期)	(交通流シナリオにて定義される範囲)
	⑥減速度		

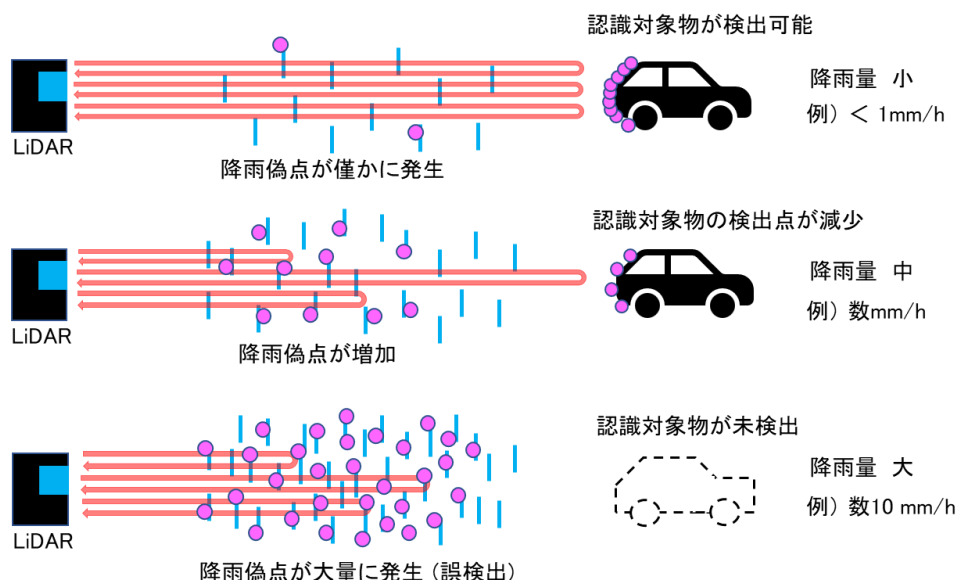


E.3.3 【LiDAR】認識対象外からの信号(雨滴での反射)

E.3.3.1 現象と原理

E.3.3.1.1 現象

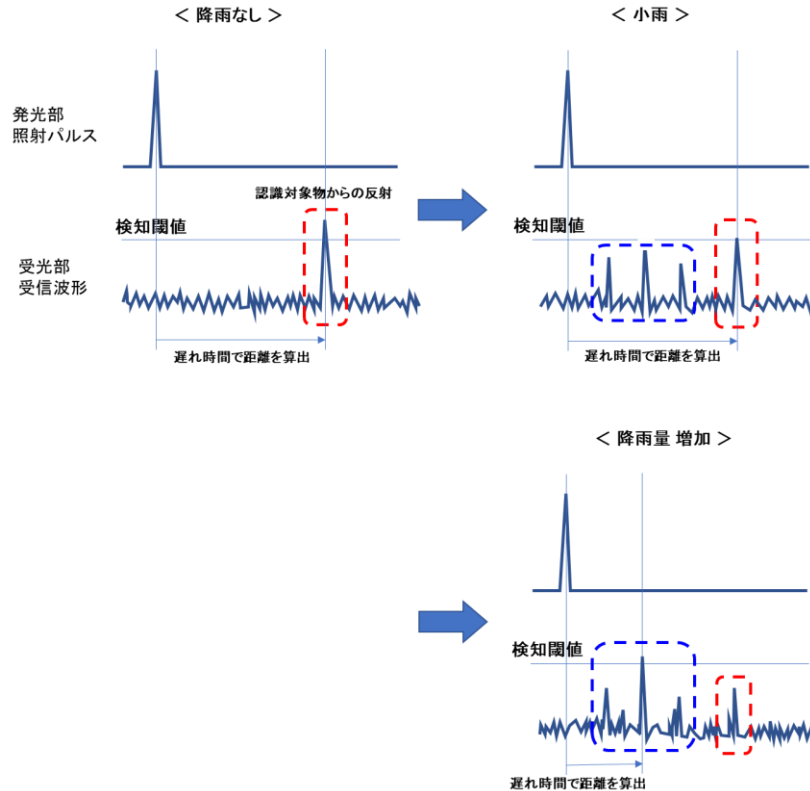
LiDARから照射されたビームが空間中の雨滴によって反射・散乱され、認識対象物からの反射信号が減衰する。また、雨滴からの反射により空間中に偽点が発生し、認識対象の検出点数が減少する。降雨量が増加するにつれて偽点の数も増加し、最終的には False Negative (未検知)が発生する。



E.3.3.1.2 原理

降雨のない環境では、下図左側のように認識対象物からの反射信号(下図赤枠)が明瞭なピーク波形として受信され、ノイズ成分との分離は容易である。降雨があると下図右側のように認識対象物からの反射によるピークの他に雨滴での反射による小さなピーク(下図青枠)が複数個発生するが、これらは小雨の場合には相対的に小さいため、偽点としては検出されない。

降雨量が増加すると、雨滴による反射強度の減衰がより大きくなり、認識対象物からの反射信号(下図赤枠)が検出閾値を下回ると同時に、雨滴による反射ピーク(下図青枠)が大きくなり検出閾値を上回る。その結果、認識対象物よりも LiDAR 自身に近い空間中に偽点が発生する。



E.3.3.1.3 原理モデル

空間中の雨滴の散乱による LiDAR 方程式(同軸型の LiDAR を仮定)

LiDAR からの距離 R にある空間中の雨滴での散乱成分の受光パワーは、以下の方程式で表される。

$$P_{RX(rain)}(R) = P_{TX} * \frac{A_{RX}}{R^2} * \rho * T$$

受光開口面積
 $A_{RX} = \pi r_{RX}^2$

半径 r_{RX}

距離: $R[m]$

検出体積
 $[m^3]$

ビーム広がり角: θ

LiDAR

ΔR

検出体積に影響するLiDARパラメータ

- ・ビーム広がり角: θ
- ・最小空間分解能: ΔR
(レーザのパルス幅、波長で決まる)

P_{TX} : 射出パワー[W]

$P_{RX(rain)}$: 雨滴からの受信パワー[W]

ここでは、雨滴からの反射(散乱)を空間中に存在する検出体積からの散乱光として捉え、雨滴による減衰を表す項(空間透過率) T と、雨滴の散乱によって受光系に戻る過程を表現する項(反射率相当値) $\rho[sr^{-1}]$ を考慮している。

雨滴による空間透過率 T へ影響を及ぼすものには、

- ・降雨量、雨滴分布(粒径、粒速)
- ・散乱発生距離
- ・LiDAR の波長 がある一方、

雨滴による反射率相当値 ρ へ影響を及ぼすものには、

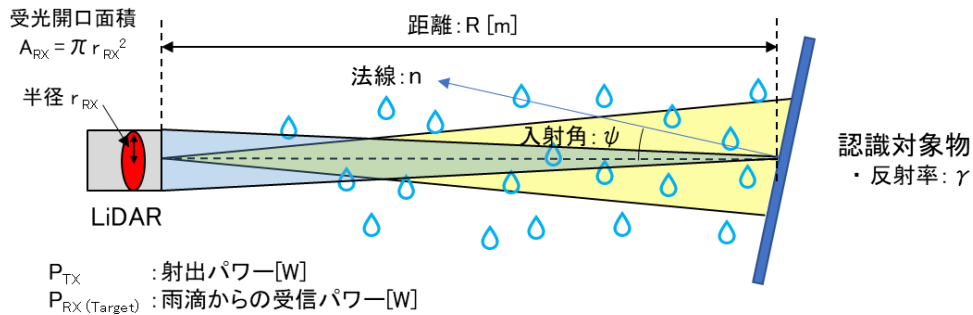
- ・降雨量、雨滴分布(粒径、粒速)

- ・ 散乱発生距離 のほか、
- ・ LiDAR のビーム広がり角、パルス幅、波長 がある。

認識対象からの反射が雨滴により減衰を受ける場合の LiDAR 方程式 (同軸型の LiDAR を仮定)

LiDAR から距離 R にある物体からの反射が、空間中の雨滴によって減衰を受ける場合の受光パワーは、以下の方程式で表される。

$$P_{RX(Target)}(R) = P_{TX} * \frac{A_{RX}}{R^2} * \gamma * \cos(\psi) * T$$



ここでは、認識対象物の反射率 (BRDF) γ [sr⁻¹] を考慮した通常の LiDAR 方程式に、雨滴による減衰を表す項 (空間透過率) T を乗じること、降雨環境下における受光パワーの低下を表現している。

雨滴による空間透過率 T へ影響を及ぼすものには、

- ・ 降雨量、雨滴分布 (粒径、粒速)
- ・ 認識対象物までの距離
- ・ LiDAR の波長 がある。

このとき、 $P_{RX(rain)}(R) > P_{RX(Target)}(R)$ となる条件下で、雨滴による偽点が発生する。

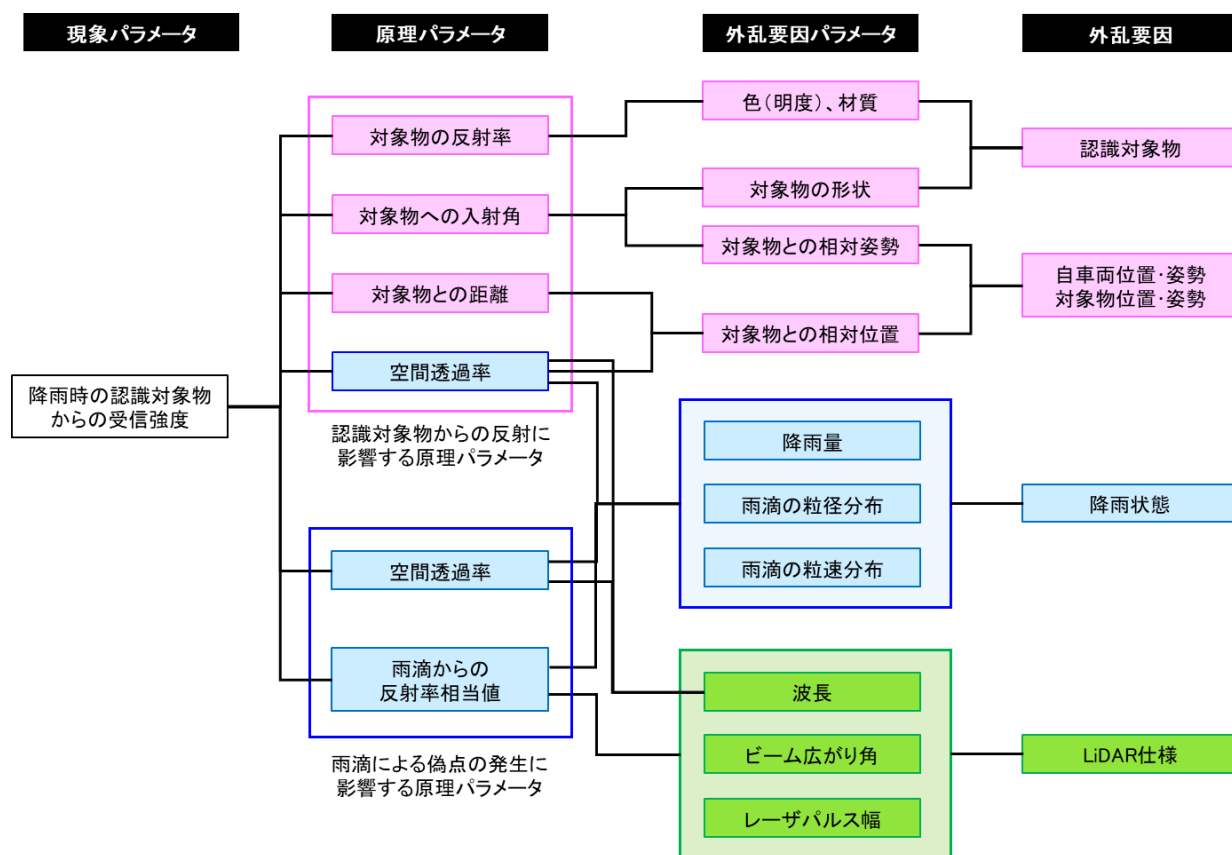
E.3.3.2 認識外乱の原理と外乱要因との関係

E.3.3.2.1 原理に基づく外乱要因

本原理において現象パラメータとなるのは認識対象物からの受信強度であり、そこから導かれる認識外乱の要因は、以下の4つに整理される。

1. 認識対象物の材質・形状・反射特性など
2. 自車両位置・姿勢と認識対象物の位置・姿勢
3. 降雨状態(降雨量・粒径分布・降雨方向など)
4. LiDAR仕様(波長・出力・受光感度・走査方式など)

これらの外乱要因と、現象パラメータおよびそれに関与する原理パラメータとの関係を整理すると、以下のよう表される。



E.3.3.2.2 パラメータ範囲

前項で示した外乱要因のうち、「認識対象物」と「自車両位置・姿勢」、「認識対象物位置・姿勢」は、他の認識外乱原理でカバーされる内容である。また、「LiDAR 仕様」は使用される LiDAR 機器固有の値を設定すべきであるので、ここでは記載対象外とする。よって、ここでは「降雨状態」に関するパラメータ範囲のみを下表に示す。

外乱要因	原理パラメータ	外乱要因パラメータ	パラメータ範囲	根拠(または理由)
降雨状態	空間透過率	降雨量	0 ～ 50mm/h	ひたちBRTバス降雨時運行条件
		雨滴の粒径分布	0.1 ～ 5mm	降雨実験施設の実測データ例より(注3)
		雨滴の粒速分布	0.1 ～ 10 m/s	同上
	雨滴からの反射率相当値	降雨量	0 ～ 50mm/h	ひたちBRTバス降雨時運行条件
		雨滴の粒径分布	0.1 ～ 5mm	降雨実験施設の実測データ例より(注3)
		雨滴の粒速分布	0.1 ～ 10 m/s	同上

注) 防災科学技術研究所 大型降雨実験施設でディストロメータを用いて計測した粒径・粒速分布データを元に設定

- ・ 降雨量設定値 50mm/h
- ・ 第2系統ノズルを使用

E.3.3.2.3 評価シナリオ

シナリオ F-1: 直線路での Cut-in シナリオ

Cut-in 車両を認識対象物として設定し、その反射率および形状、降雨条件を変化させながら評価する。

【パラメータ】

(*) の項目は、記載範囲内から評価条件を選択する

外乱要因パラメータ	降雨状態	①降雨量(*)	0 ～ 50 mm/h
		②粒径分布(*)	0.1 ～ 5mm
		③粒速分布(*)	0.1 ～ 10m/s
評価に必要なその他パラメータ	認識対象物	④反射率	塗装材＝黒、白、エフェクト顔料(メタリック/パール)
		⑤形状	車両＝乗用車、バイク
		⑥相対位置	(交通流シナリオにて定義される範囲)
	⑦自車速		ODD内の最大車速
	⑧相対車速		(交通流シナリオにて定義される範囲)
	⑨Cut-in横速度		



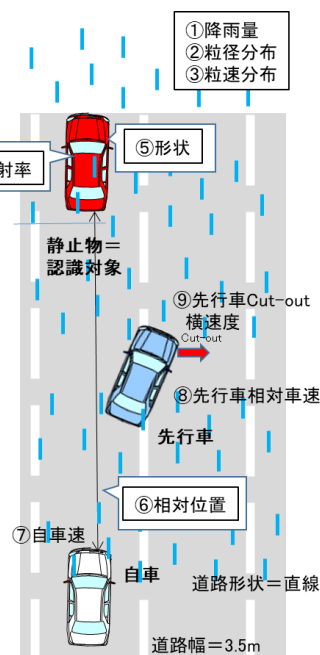
シナリオ F-2: 直線路での Cut-out シナリオ

先行車が Cut-out した前方の走行路上に静止した認識対象物を配置し、その反射率および形状、降雨条件を変化させながら評価する。

【パラメータ】

(*) の項目は、記載範囲内から評価条件を選択する

外乱要因パラメータ	降雨状態	①降雨量 (*)	0 ~ 50 mm/h
		②粒径分布 (*)	0.1 ~ 5mm
		③粒速分布 (*)	0.1 ~ 10m/s
評価に必要な その他パラメータ	認識対象物	④反射率	塗装材=黒、白、 エフェクト顔料(メタリック/パール)
		⑤形状	車両=乗用車、バイク
		⑥相対位置	(交通流シナリオにて定義される範囲)
	⑦自車速		ODD内の最大車速
	⑧相対車速		(交通流シナリオにて定義される範囲)
	⑨Cut-out横速度		



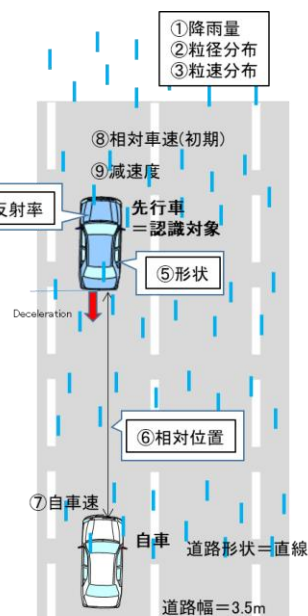
シナリオ F-3: 直線路での Deceleration シナリオ

減速車両を認識対象物として設定し、その反射率および形状、降雨条件を変化させながら評価する。

【パラメータ】

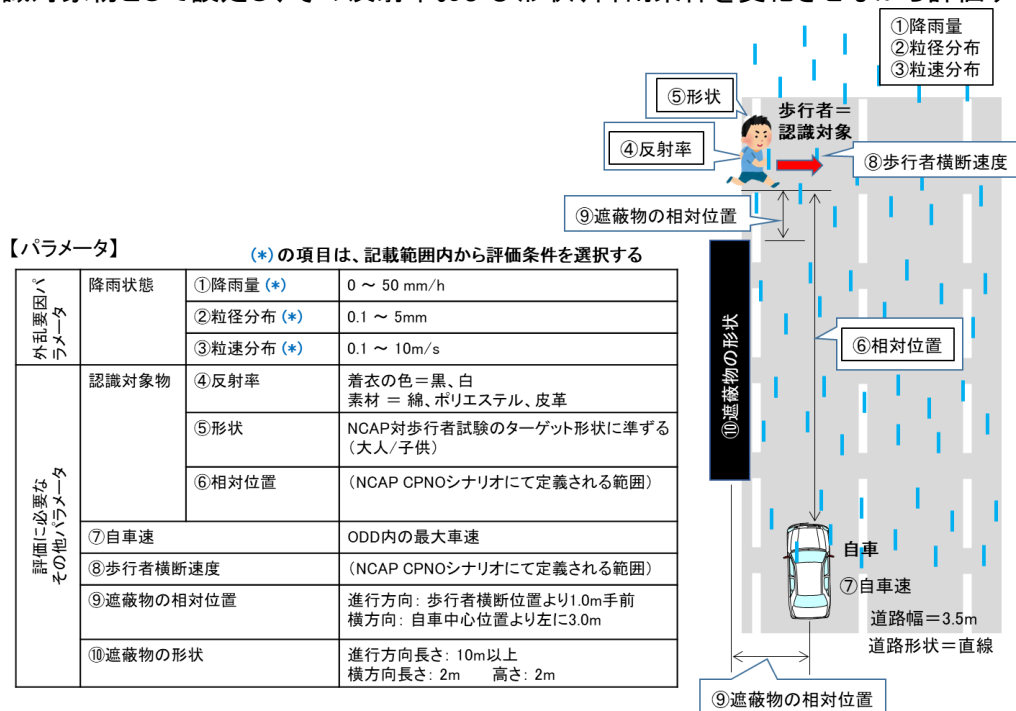
(*) の項目は、記載範囲内から評価条件を選択する

外乱要因パラメータ	降雨状態	①降雨量 (*)	0 ~ 50 mm/h
		②粒径分布 (*)	0.1 ~ 5mm
		③粒速分布 (*)	0.1 ~ 10m/s
評価に必要な その他パラメータ	認識対象物	④反射率	塗装材=黒、白、 エフェクト顔料(メタリック/パール)
		⑤形状	車両=乗用車、バイク
		⑥相対位置	(交通流シナリオにて定義される範囲)
	⑦自車速		ODD内の最大車速
	⑧相対車速		(交通流シナリオにて定義される範囲)
	⑨減速度		



対歩行者:歩行者の横断シナリオ

歩行者を認識対象物として設定し、その反射率および形状、降雨条件を変化させながら評価する。



E.4 カメラの原理モデルと評価シナリオ

カメラについては、例として下記3つの認識外乱の原理について原理モデルと評価シナリオを記述する。

- ・ 遮蔽（見切れ）
- ・ 空間周波数低下・コントラスト低下（空間障害物）
- ・ 飽和（過多）、白飛び

E.4.1【カメラ】遮蔽（見切れ）

E.4.1.1 現象と原理

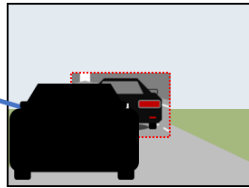
E.4.1.1.1 現象

遮蔽物による遮蔽、または認識対象が FOV（視野範囲）外へ出ることにより、認識対象物の一部または全体が不可視となる。その結果、特徴抽出に必要な情報が欠損し、False Negative（未検出）が発生する、あるいは位置情報に誤差が生じる場合がある。

<事例>

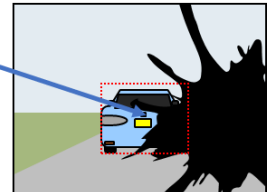
路上の障害物(他交通参加者含む)による遮蔽

認識対象との間に他交通参加者や路上の構造物が存在し、認識対象の特徴が阻害される

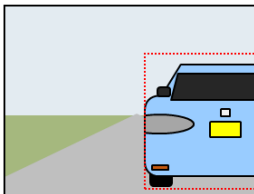


汚れによる遮蔽

WSやカメラレンズの汚れにより、画面が遮蔽される



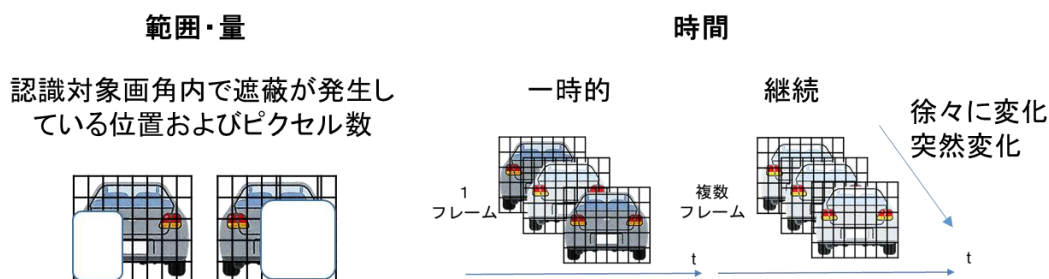
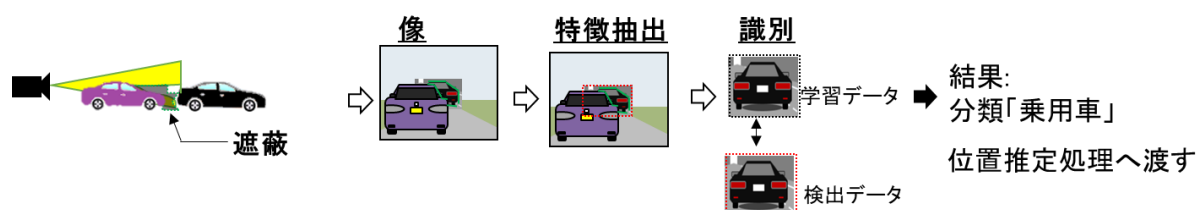
FoV外による遮蔽



カメラの画角の外にターゲットの一部が出ることによって、遮蔽と同じ状況が発生する

E.4.1.1.2 原理

認識対象の一部が遮蔽されている場合、カメラの認識機能が正しく特徴抽出をできないことがある。または、特徴抽出ができた場合でも、識別機能において学習データとのマッチングが成立しないことがあり、その結果、未検出または分類誤りに至ることがある。

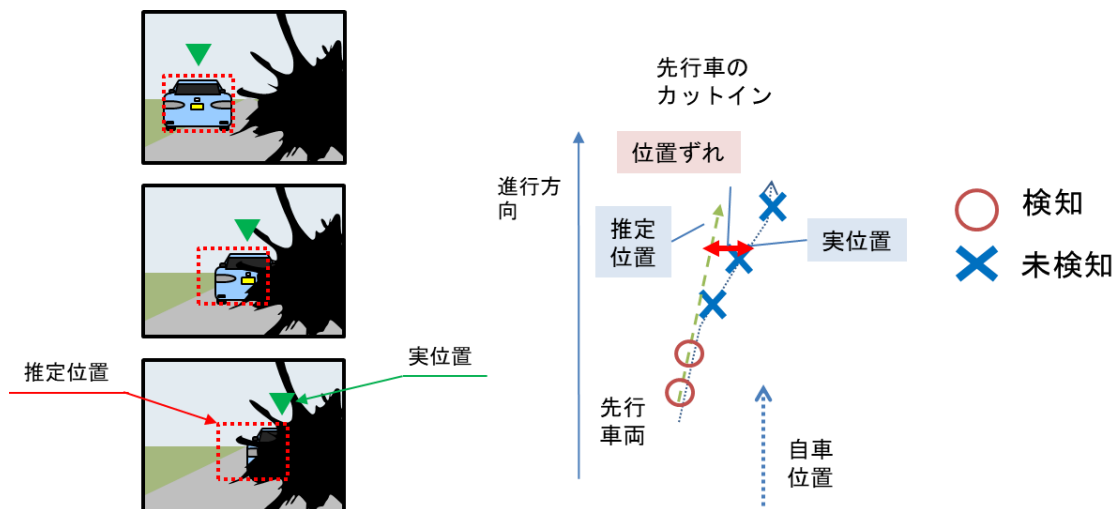


下図は、遮蔽の程度・時間と起こる現象とを整理したものである。

現象モード		A		B		C	
		1	2	1	2	1	2
程度	量	各センサー 不調原理毎に定義					
	範囲	画角内の全範囲 		認識対象に付帯 認識対象の一部が遮蔽 		画角に付帯 遮蔽された画角に認識対象が侵入 	
時間	単位時間当たりの変化量	不調原理・外乱要因により変化量の範囲を定義					
	継続時間	持続的 	一次的 	持続的 	一次的 	持続的 	一次的
外乱要因と評価ケース		持続的に画角内全域が遮蔽され、それが除去されない場合	持続的に画角内全域が遮蔽され、それがワイパーなどによって除去される場合	認識対象物の表面に付着物がある場合	遮蔽されている状態とされていない状態の変化点	画角の一部が汚れていて、それが除去されない場合	画角の一部が汚れていて、それがワイパーなどによって除去される場合

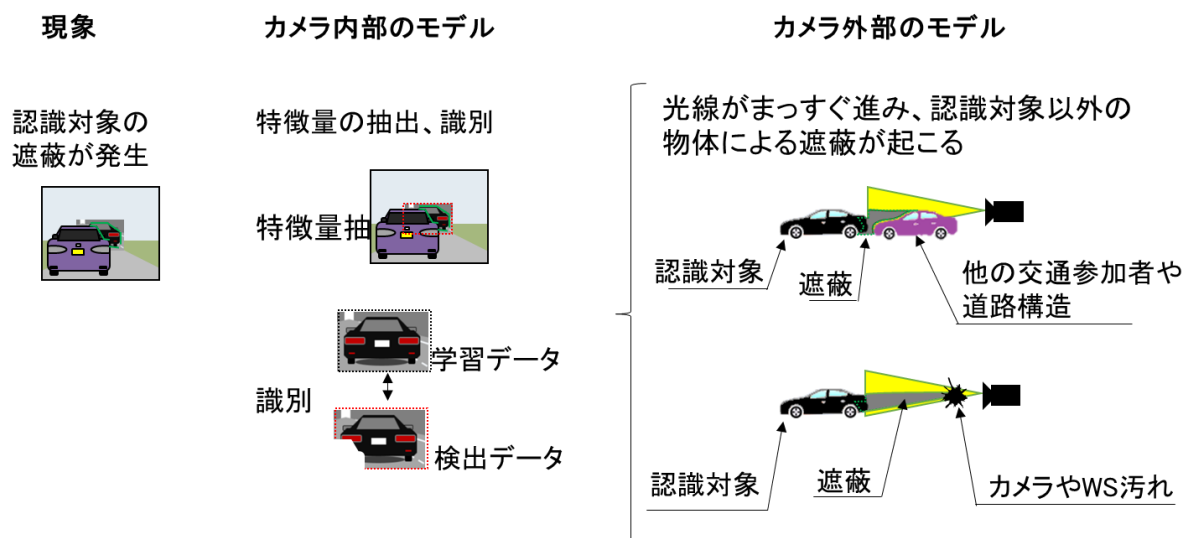
正しく特徴抽出が行えない場合、対象物の大きさ・向き・位置を正確に検知することができない。さらに、向きや位置の検知が不正確である場合には、トラッキング処理に誤差が生じ、結果として推定位置や速度などの認識誤差が発生する。

事例



E.4.1.1.3 原理モデル

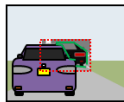
カメラ内部のモデルと外部のモデルとは、下図のような関係にある。



カメラ内部のモデル

特徴量抽出、識別には様々な手法が存在し、特定できないため、ここでは古典的手法の例を挙げる。

特徴量抽出



【形状検出】

特徴点・コーナ点・エッジの抽出は微分作用素を近似し、その固有解析や極値探索を行うのが基本
ex) エッジ検出、コーナ検出、Blob(小塊)検出など

【図形検出】

直線検出、円検出(ハフ変換)

【領域抽出】

画像の領域を分割する処理・対象の領域を切り出して他の領域と区別する

識別



学習データ



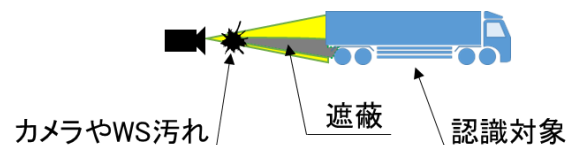
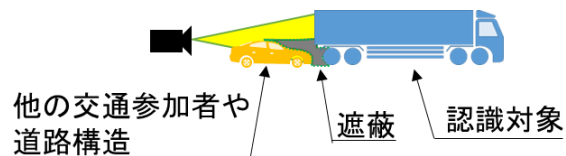
検出データ

学習データと類似性の高い箇所をスクリーニングする処理

ex) テンプレートマッチング、色に基づく検出、エッジを用いた検出、特徴量マッチング

カメラ外部のモデル

光線がまっすぐ進み、認識対象以外の物体による遮蔽が起こる



<認識外乱と直接影響のあるモデル>

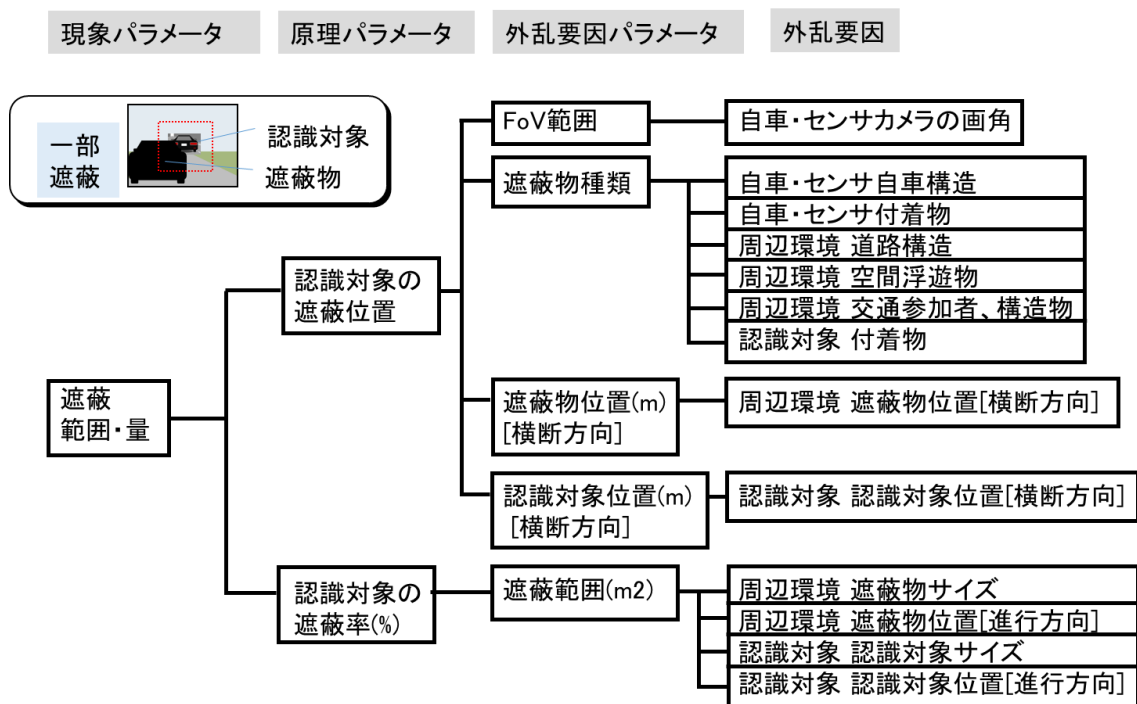
- ・ 物体から発せられた光(反射光含む)が同一媒質中を直進するモデルを用いる

<認識外乱への影響度合いの小さいモデル>(参考)

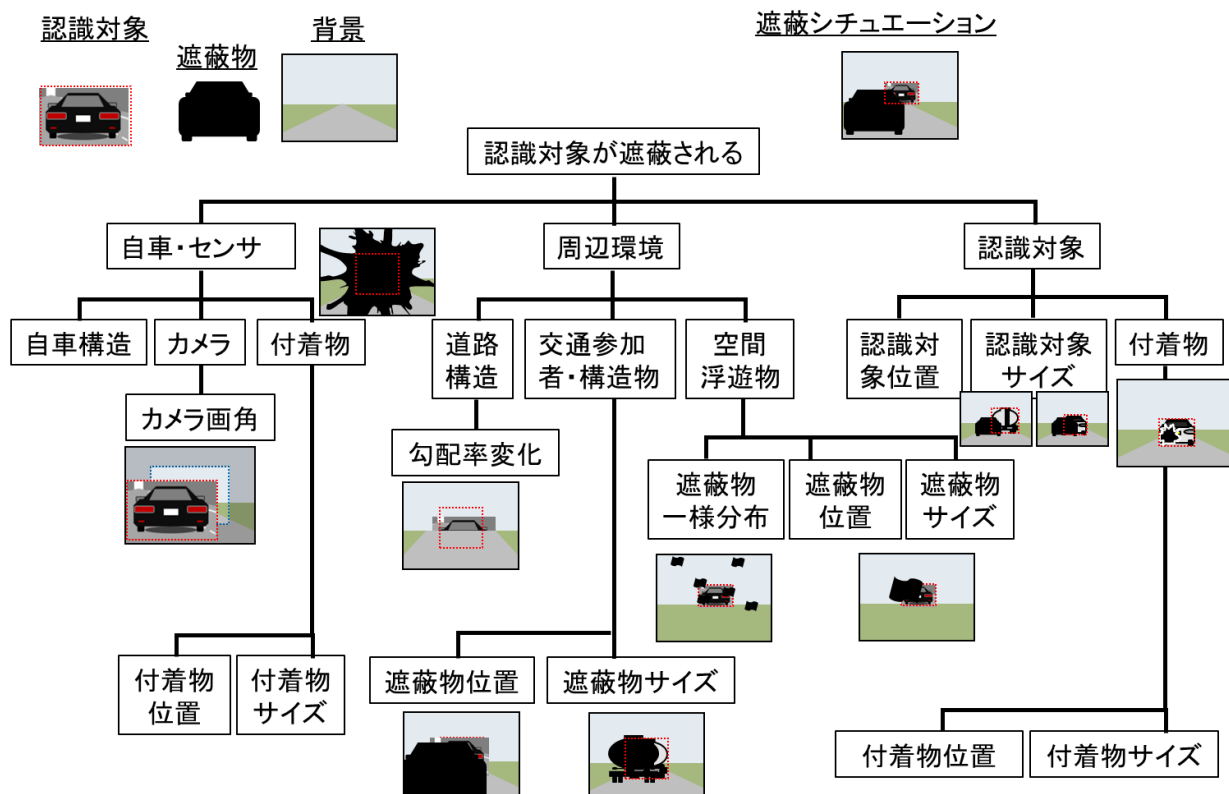
- ・ ガラス面や雨水などの媒質の境界面では屈折が発生する
- ・ 厳密には、電磁波(可視光含む)で知られた現象として回折があるが、影響の程度から遮蔽の要因では問題とはしない

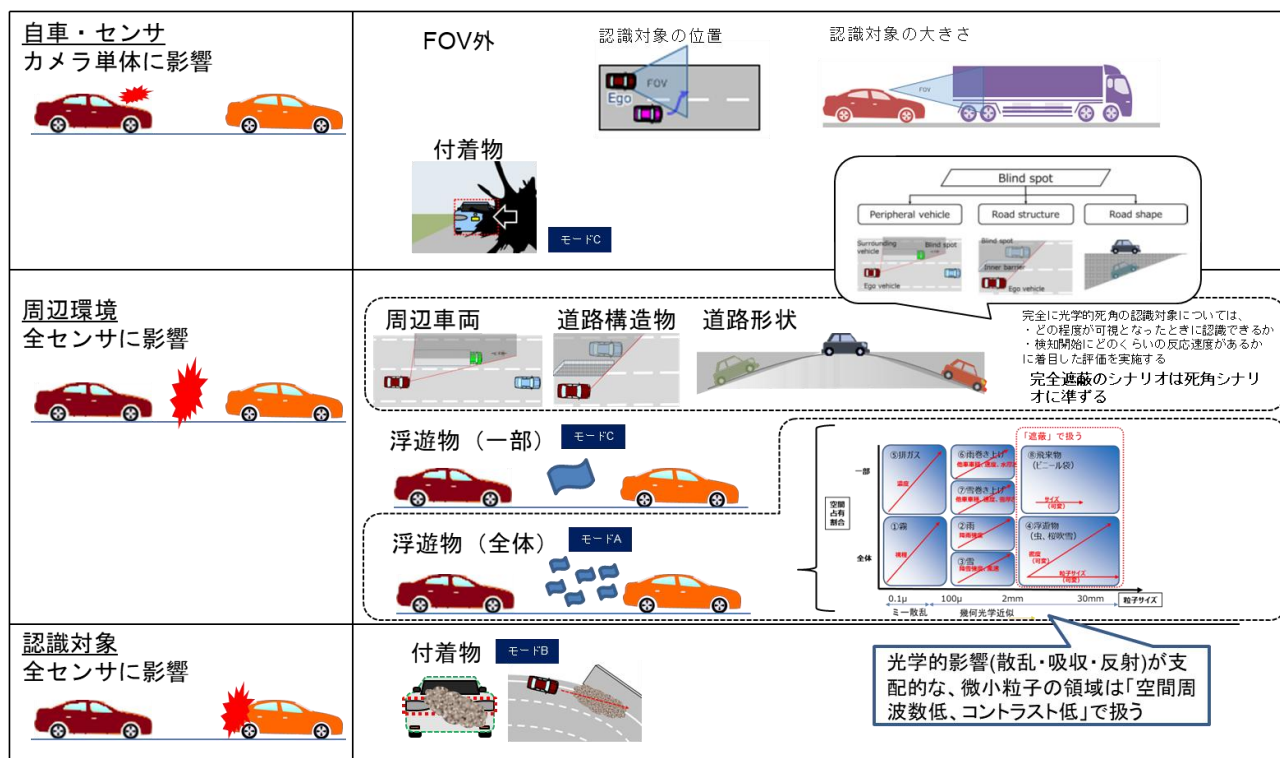
E.4.1.2 認識外乱の原理と外乱要因との関係

E.4.1.2.1 原理に基づく外乱要因



外乱要因を整理し直すと、以下のようになる。





E.4.1.2.2 パラメータ範囲

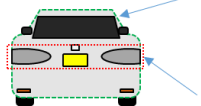
各パラメータの範囲は、以下のように設定する。

現象 パラメータ	原理 パラメータ	外乱要因 パラメータ	外乱要因	パラメータ範囲	条件	
					STEP1	STEP2
量・ 範囲	認識対象 の遮蔽位置	FoV範囲	自車・センサ カメラの画角	0 ~ ±(検査対象のカメラの FOV最大角) [deg.]		
		遮蔽物種類	自車・センサ 自車構造	ワイパ、ボンネット (FOV内に入る自車部品)		
			自車・センサ 付着物	Windshield FOV内 遮蔽率 0~ 100[%]	汚れが付着し、ワイ パーによって拭 き取られる	画面隅が汚れて いる
			周辺環境 空間浮遊物	一様分布: 割合 0~100 [%] 単一: 大きさ 0~x [m]		
			周辺環境 道路構造	道路形状の縦断勾配 0~6 [%] (凸形状)		
			周辺環境 交通参加者、構造物	交通参加者: 車両 構造物: 側壁		
	認識対象位置 [m] [横断方向]	周辺環境 遮蔽物位置[横断方向]	ラップ率 0~100 [%]		認識対象の遮蔽 率25%程度、横断 方向の位置	認識対象の遮蔽 率50%程度、横断 方向の位置
		認識対象位置 [m] [横断方向]	認識対象 認識対象付着物	泥		
			認識対象 認識対象位置[横断方向]	認識対象幅Wと遮蔽物幅の中 心を基準として、0 ~ W/2 [m]		
		認識対象 の遮蔽率 [%]	周辺環境 遮蔽物サイズ	自動二輪車~大型トラックのサ イズ	軽自動車による遮 蔽	大型トラックによ る遮蔽
			周辺環境 遮蔽物位置[進行方向]	速度に応じた適切な車間距離		
			認識対象 認識対象サイズ	乗用車相当		
			認識対象 認識対象位置[進行方向]	速度に応じた適切な車間距離		

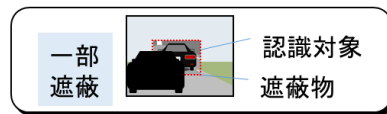
また、遮蔽位置によって認識への影響のしかたが異なるため、より厳しい条件となる、認識対象物の特徴を隠す下図 C, D エリアの遮蔽を評価対象とする。

遮蔽位置について

認識阻害



- ①対象の輪郭認識阻害
背景とのコントラストの差がなくなる。
輪郭が遮蔽される。
- ②対象の特徴認識阻害
認識対象としての特徴
(左記例ではバックライトやナンバープレート)
が遮蔽される。



遮蔽物の影響パターン

対象の輪郭認識阻害

		なし	あり
対象の特徴 認識阻害	なし		
	あり		






必須となる評価ケース

特徴を遮蔽する C D の評価が必須
※CD同時遮蔽含む



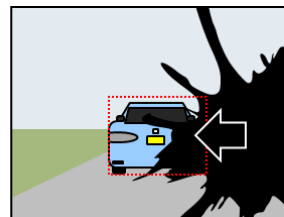
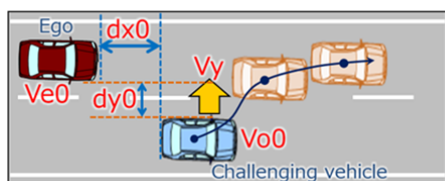
E.4.1.2.3 評価シナリオ

ALKS シナリオと外乱要因を紐づけて、Functional Scenario を導出する。

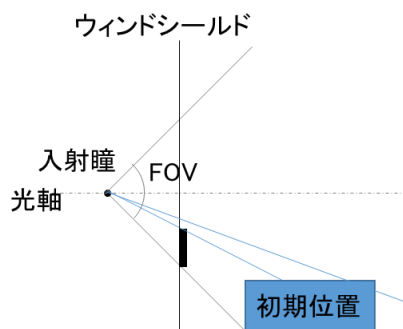
Functional Scenario	ALKSシナリオ	走路			交通情報		移動物			路上障害物			空間		考え方			
		区画線	構造物	ロードエッジ	信号	標識	路面標示	他車	バイク	自転車	歩行者	落下物	設置物	動物		太陽光	路面	上方・トンネル
F-1	Cut-in		○					○	○	○			○					
F-2	Cut-out		○					○	○	○	○		○					
F-3	Deceleration		○					○	○	○			○					
F-B1-14	Lane-keep		○	○	○	○							○	○				
F-4	Blind-spot (Vertical)		○						○	○			○	○				

シナリオ F-1: 直線路での Cut-in シナリオ

付着物によりセンサ視野が制限された状態で、認識対象物が自車線前方に一定の横速度で進入する。



パラメータ項目	変化／固定	範囲	説明
対象物までの距離	変化	縦位置 $dx0$ [m]	最も遅い速度でのCut-in 距離からセンサの最大検知距離まで
		横位置 $dy0$: 3.5m	
対象物との相対車速	変化	縦速度 $Vo0 - Ve0$ [kph] 横速度 Vy [kph]	ALKSでのpreventable基準に照らし最も早い速度と遅い速度
対象物の種類	固定	形状: セダン 色 : 白	シナリオを遮蔽率で規定するため、対象部の大きさ形状に依らない。標準的な対象物を選択
付着物(外乱要因)による認識対象の遮蔽率	変化	認識対象のバウンディングボックスに対して ① 初期50% → 最終0% ② 初期100% → 最終50%*	*初期100%の場合、最終の値はシナリオに依存する(目安として50%に近くなるよう遮蔽物の大きさを決める)



カットイン後の位置、距離が正しく出力されるか否かで安全に制御されるかどうかが決まる

最終位置

最終位置の遮蔽率はシナリオで決定されるものの、遮蔽物の配置によってある程度の範囲を持つ

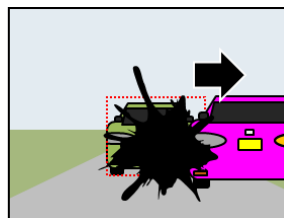
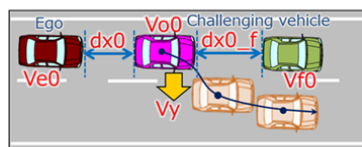
入射瞳とウィンドシールドの距離は一定のため、ターゲット初期位置と遮蔽率が決まれば、遮蔽物の大きさに対する制限が決まる。遮蔽物の位置が任意のため、大きさは一意には決まらない(ターゲットに対する視野角よりも大きくてもよい)



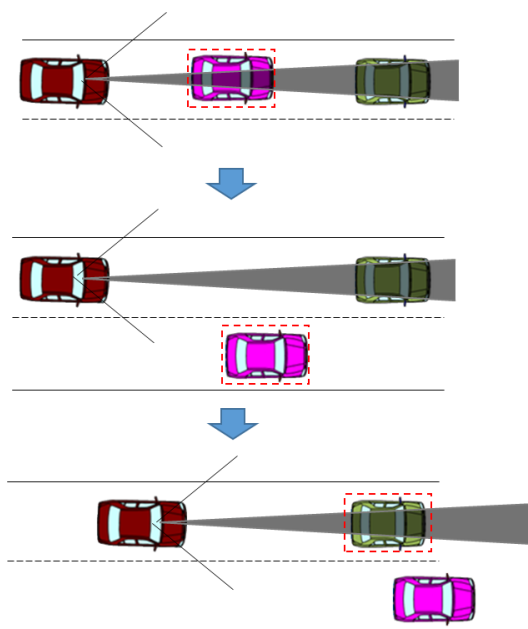
初期状態の遮蔽率を順守しつつ、最終状態の遮蔽率になるべく近い、大きさ、位置が設定されることが望まれる

シナリオ F-2: 直線路での Cut-out シナリオ

遮蔽されている位置から認識対象が Cut-out する。手前の認識対象は一部が見えている状態だったが、Cut-out した先に存在する認識対象では遮蔽率が高くなる。



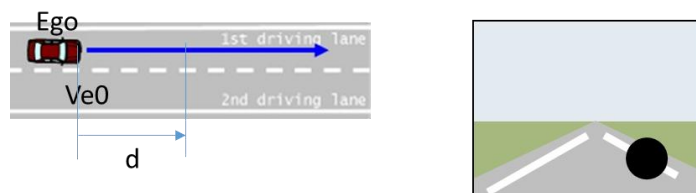
パラメータ項目	変化／固定	範囲	説明
対象物までの距離	変化	縦位置 $dx0$ [m]	最も遅い速度での Cut-out 距離からセンサの最大検知距離まで
		縦位置 $dx0_f$ [m]	
対象物との相対車速	変化	縦速度 $Vo0 - Ve0$ [kph]	カットアウトシナリオでの preventable 基準に照らし最も早い速度と遅い速度
		縦速度 $Vo0 - Vf0$ [kph]	
		横速度 Vy [kph]	
対象物の種類	固定	形状: セダン 色 : 白	シナリオを遮蔽率で規定するため、対象部の大きさ形状に依らない。標準的な対象物を選択
付着物(外乱要因)による認識対象の遮蔽率	変化	認識対象のバウンディングボックスに対して ① 初期50% → 最終0%	遮蔽率は先行車に対して設定する



先行車が完全遮蔽状態では、カメラ認識は不可能であるため、遮蔽検知機能など別のケースとなる。ここでは遮蔽による認識対象への位置や距離の出力結果の誤差を問題としているため、先行車の完全遮蔽は含めない。

シナリオ F-B1-14: 直線路での Lane Keep シナリオ

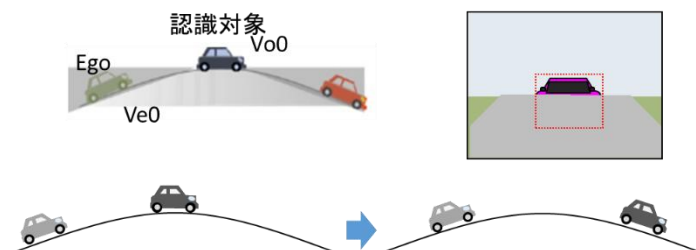
遮蔽されている状態で自車線に沿って一定速度で走行する。



パラメータ項目	変化／固定	範囲	説明
自車速度	固定	Ve0: 120 kph	日本での高速道路最高速度
車線幅	固定	3.5m	日本での高速道路の通常車線幅
車線曲率	固定	R380	
対象物の種類	変化	形状: 実線、破線 色: 白、黄	
付着物(外乱要因)による自車線区画線の遮蔽率	固定	遮蔽率: 50%	
付着物の中心に相当する区画線位置	固定	d: 20m/ 60m/ 100m	

死角シナリオ (縦断勾配)

縦断勾配のある路面(凸形状)を走行、自車線前方の認識対象物に一定速で接近する。



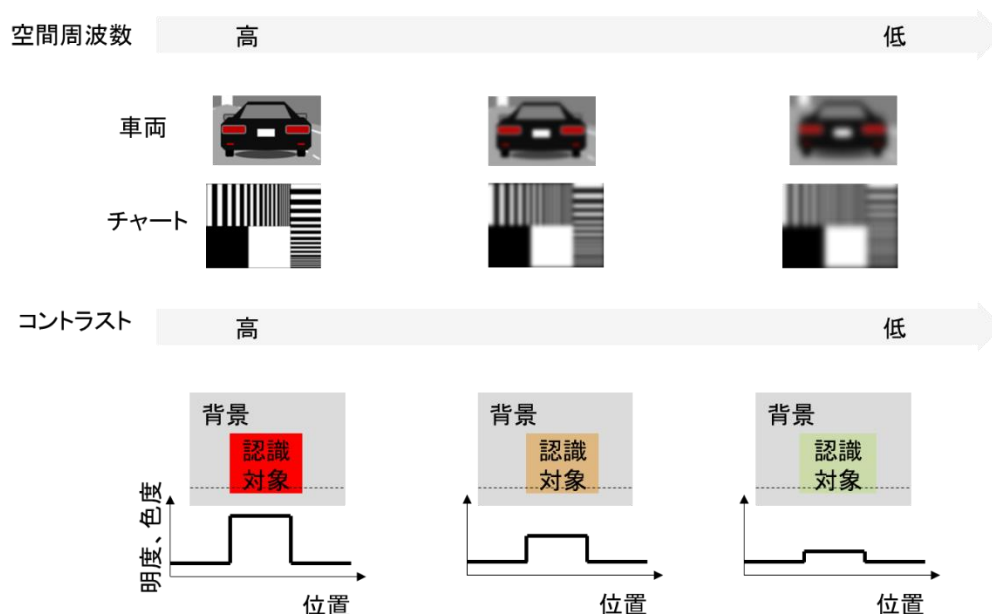
パラメータ項目	変化／固定	範囲	説明
対象物までの距離	変化	縦位置 dx0 [m]	認識対象の接地面が見える限界から認識対象の上部が見える限界まで。
対象物との相対車速	固定	縦速度 Vo0-Ve0 [kph]	組合わせる交通流シナリオに従う
対象物の種類	固定	形状: セダン 色: 白	シナリオを遮蔽率で規定するため、対象物の大きさ形状に依らない。標準的な対象物を選択
道路構造縦勾配	固定	縦断勾配: 6%	道路構造令を参考に最も厳しい値

E.4.2 【カメラ】空間周波数低下・コントラスト低下（空間障害物）

E.4.2.1 現象と原理

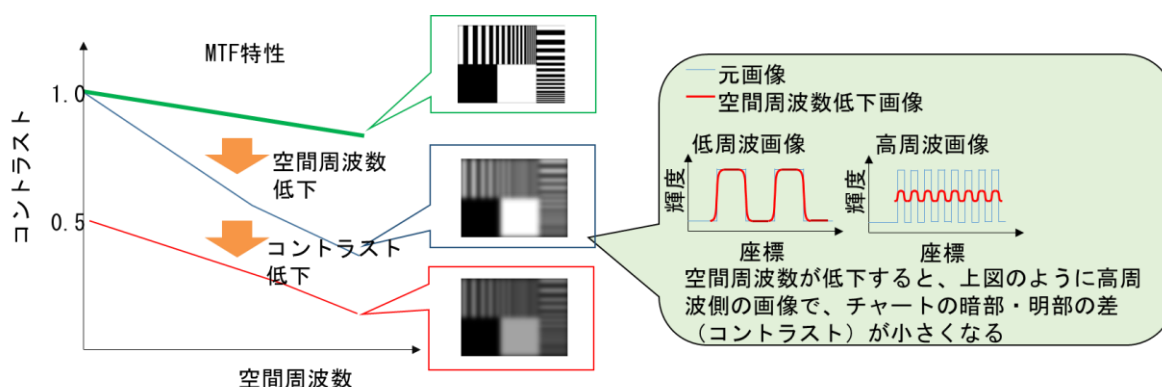
E.4.2.1.1 現象

雨・雪・霧などの空間浮遊物によって、認識対象物の輪郭ぼけ（空間周波数の低下）が発生する。このとき、同時に画像全体のコントラスト低下も生じる（下図）。



画像における空間周波数の低下およびコントラスト低下の程度は、MTF (Modulation Transfer Function) で表せる。空間周波数の低下は、高周波成分における MTF の低下として表現され、これは画像のぼけ（解像度低下）に相当する。

一方、コントラストは認識対象物と背景との明度差（比）や色度差（比）で定義され、画像全体のコントラスト低下は全周波数帯域における MTF の低下として表現される。



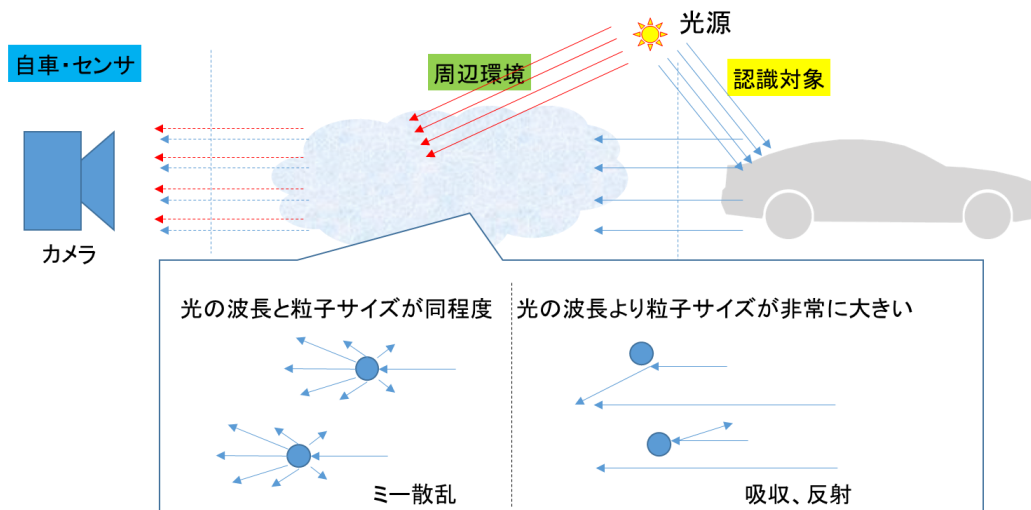
MTF (Modulation Transfer Function: 変調伝達関数) は、センサに正弦波信号を入力した際の周波数と入出力波形の振幅比との関係を示す特性であり、被写体のある位置からの光を、画像上の対応する位置にどの程度正確に結像できるかを表す指標である。

これは、レンズ性能を数値的に評価・検査するための代表的な特性であり、結像の良否（解像力）とコントラスト再現性を同時に評価することができる。

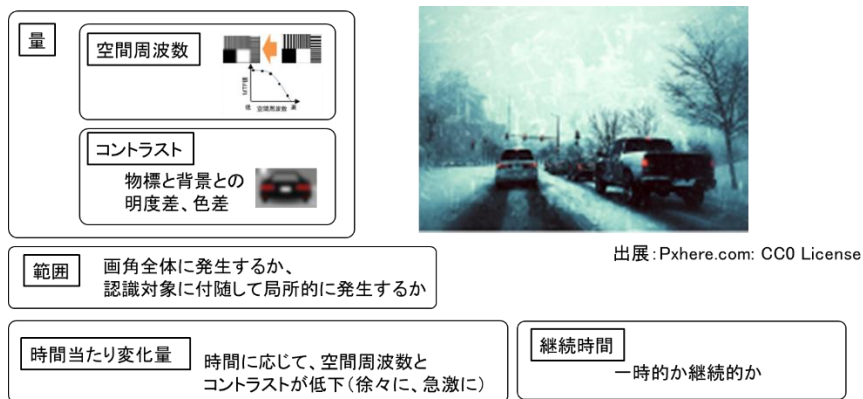
E.4.2.1.2 原理

空間中に障害物(粒子)が存在する場合、認識対象物から反射した光はそれら粒子に衝突することで散乱・吸収・反射され、カメラに到達するまでの間に減衰する。この散乱・吸収・反射の程度は、粒子のサイズや空間密度に依存する。

カメラに入射する最終的な輝度は、対象物からの減衰した反射光の輝度に、光源からの直接光が空間中の粒子で散乱した成分の輝度が加算されたものと表れる。



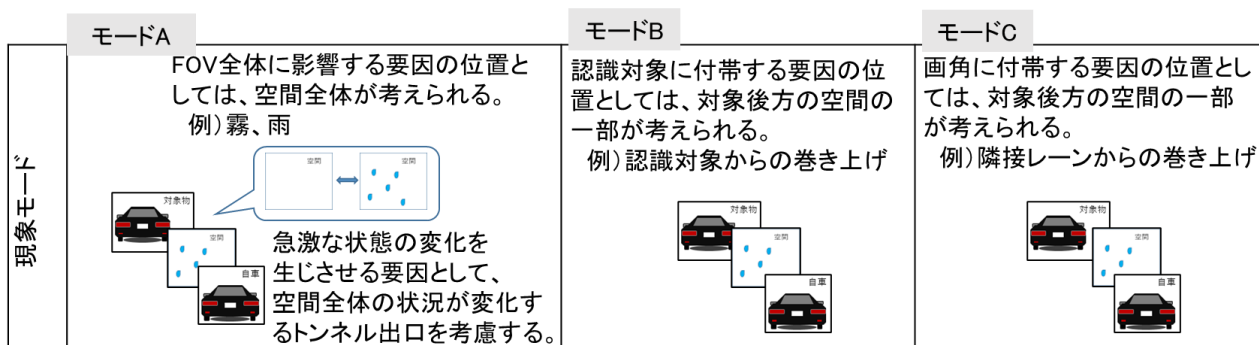
現象パラメータは下図に示すように、空間周波数、コントラスト、(本現象の起こる)範囲、時間当たりの変化量、継続時間の5つとなる。



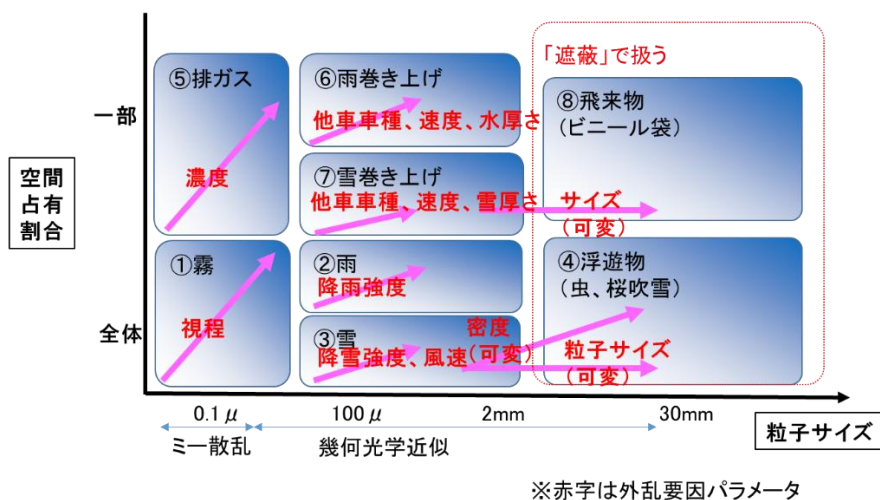
各パラメータと現象の関係を整理すると、以下のようになる。

		A				B				C			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
現象パラメータ	量	認識外乱の原理ごとに定義											
	範囲	画角内の全範囲 				認識対象に付帯 				画角に付帯 			
	単位時間 変化量	徐々に変化		急激に変化		徐々に変化		急激に変化		徐々に変化		急激に変化	
	継続時間	持続的 	一時的 	持続的 	一時的 	持続的 	一時的 	持続的 	一時的 	持続的 	一時的 	持続的 	一時的

現象が起こる範囲に応じて、下記 A～C の 3 つのモードに分類できる。

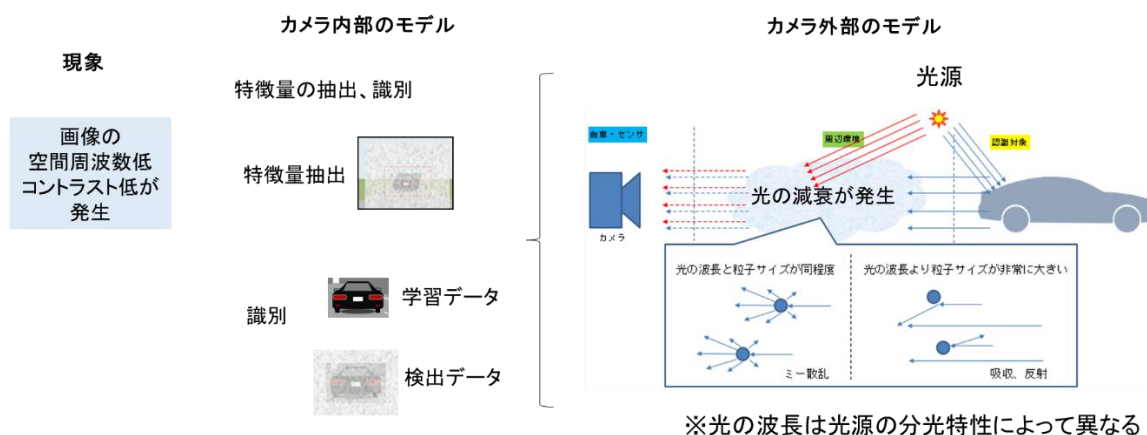


また、空間障害物の種類と粒子サイズ、空間占有割合との関係を示すと下図ようになる。この中で、④浮遊物と⑧飛来物については、E.4.1 遮蔽 で取り扱う範囲とする。



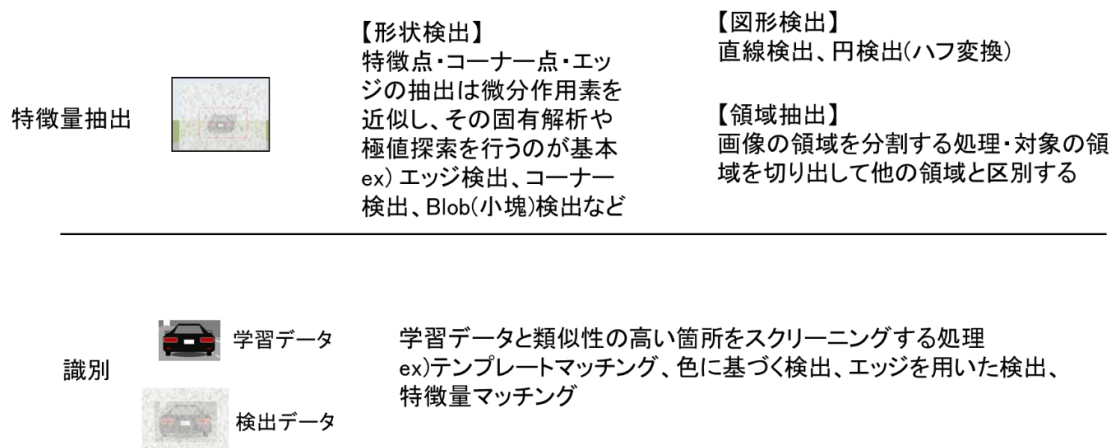
E.4.2.1.3 原理モデル

カメラ内部のモデルと外部のモデルとは、下図のような関係にある。



カメラ内部のモデル

特徴量抽出、識別には様々な手法が存在し特定できないため、ここでは古典的手法の例を挙げる。



カメラ外部のモデル

Koschmieder の輝度減衰モデル(下式)では、減衰係数 σ (\equiv 視程) と距離 d の増加に伴い、認識対象物の見かけの輝度が環境光の輝度(背景の輝度)に近づくことが示されている(コントラストの低下)。

$$L = L_0 e^{-\sigma d} + L_f (1 - e^{-\sigma d})$$

L : 対象物の見かけの輝度
 L_0 : 散乱がない場合の対象物の輝度
 L_f : 環境光の明るさ(空の輝度)

ここで、 L は認識対象物の見かけの輝度、 L_0 は散乱がない場合の認識対象物の輝度、 L_f は環境光の明るさ(背景の輝度)である。(出典: Mori, "Fog Density Recognition by In-vehicle Camera and Millimeter Wave Radar", IJICIC vol.3, Num.5 Oct 2007)

また、大気中の光の減衰により、ある認識対象物を距離 d から見たときのコントラスト C は下記のように表せる。

$$C = e^{-\sigma d}$$

ここで σ は光の減衰係数(消散係数)すなわち光の強度が距離と共に減衰する割合である。

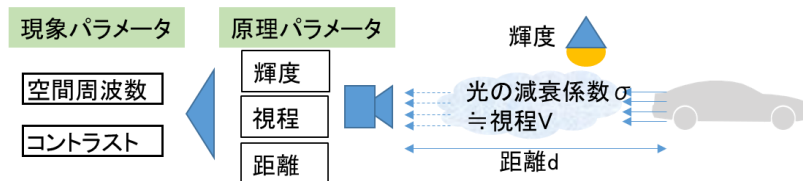
コントラストの識別限界値を ε_0 とすると、視程 V は下記のように表され(Koschmieder の式)、 ε_0 は経験的に 0.02 や 0.05 という値をとる。

$$V = \frac{1}{\sigma} \ln \left(\frac{1}{\varepsilon_0} \right)$$

$$V = \begin{cases} 3.912/\sigma & (\varepsilon_0 = 0.02) \\ 2.996/\sigma & (\varepsilon_0 = 0.05) \end{cases}$$

一般的な視程計は、世界気象機関(WMO)が定義する気象光学距離 MOR(2700K の白熱灯の平行ビームによる照度が元の値の 5%まで減少する距離)を計測する。(出典: 日本雪工学会誌 20 巻(2004) 3 号 "視程の測定" 高田、地学雑誌 Journal of Geography 100(2) 264-272 1991 "大気中の雪粒子と視程", 竹内)

よって、コントラストに影響を与えるのは、光源の明るさ(輝度)、光の減衰係数 σ 、距離 d と考えらえる。また、 σ と視程 V は一義的に対応する値であり、一般的に視認距離の計測には視程を用いるため、原理パラメータは輝度、視程、距離とする。



空間障害物と空間周波数の関係については、各文献に定性的な記載はあるが、原理式等は見当たらないため、コントラストと同じ原理パラメータを置くこととする。

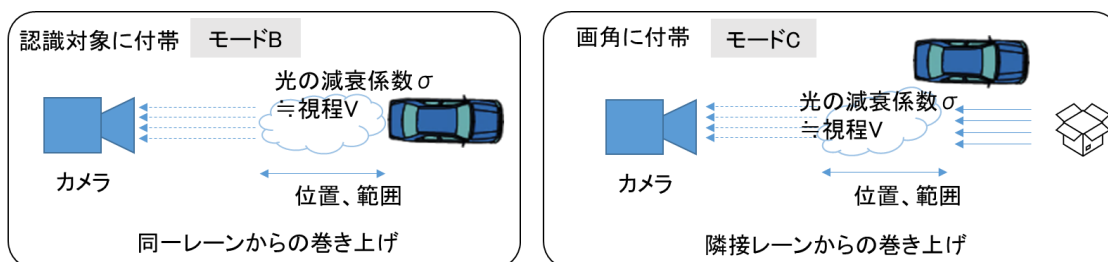
前述の現象モード A~C について、原理を詳細に記述する。

モード A: 一様な空間障害物

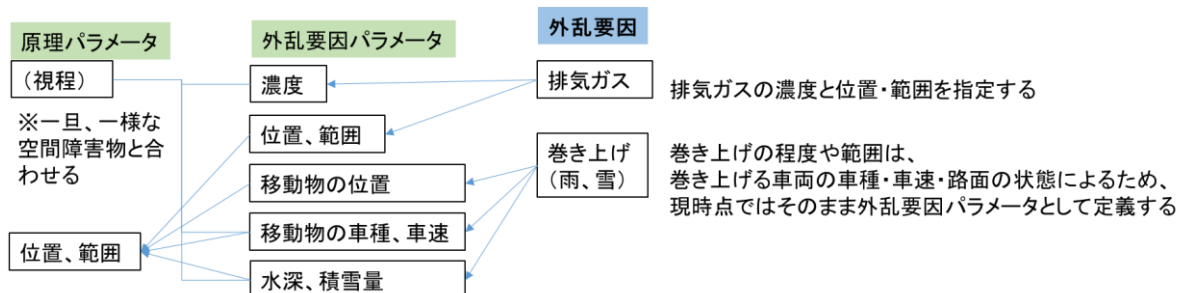
①霧	霧の濃度(減衰係数)を一般的に視程で示すため、外乱要因パラメータも同様に視程とする。	
②雨	いくつかの文献があるが、 降雨強度 に伴って、視程が変化する。 例) $V = 8807.1e^{-0.1R}$ R:降雨強度[mm/10min]	出典: 西村, 避難行動に係わる濁水と見通し距離との関係, 2015, 砂防学会研究発表会, 筑波大学
③雪	いくつかの文献があるが、 降雪強度 や 風速 に伴って、視程が変化する。 例) $V = 1150 \cdot \left(\frac{5}{3}R\right)^{-0.76}$ R:降雪強度[mm/h] M_f : 飛雪流量 (降雪強度と風速による) $V = 10^{-0.77 \log(M_f) + 2.85}$	出典: 斎藤, 1971, 降雪の強さと視程, 国立防災科学技術センター研究報告 出典: 松澤, 2007, 吹雪時の視程推定手法の改良に関する研究, 日本氷雪学会誌

モード B, C: 局所的な空間障害物

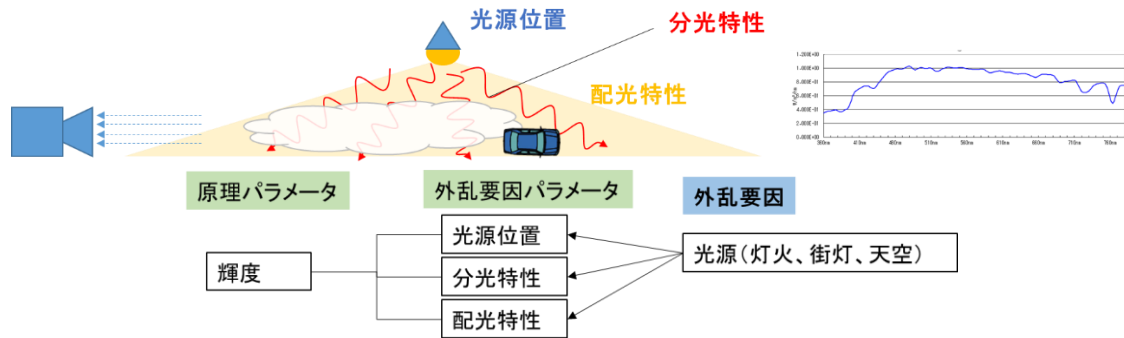
原理は「一様な空間障害物」と同じであるが、範囲が限定的であるという点異なる。



原理パラメータ、外乱要因パラメータを暫定的に下記のように置く。



また、光源の明るさ(輝度)は光源の分光特性、光源位置、配光特性により決まる。



光源の視認性に対する影響として、特に夜間環境においては、認識対象物の光源(例:テールランプなど)が、検出の主要な特徴量となり得るが、霧などの空間障害物が存在する場合には光幕現象(veiling effect)が発生し、光源自体の輝度分布に光幕の輝度分布が重畳される。このとき、光幕の輝度は光源から外側に向かって徐々に減少する分布を示す。

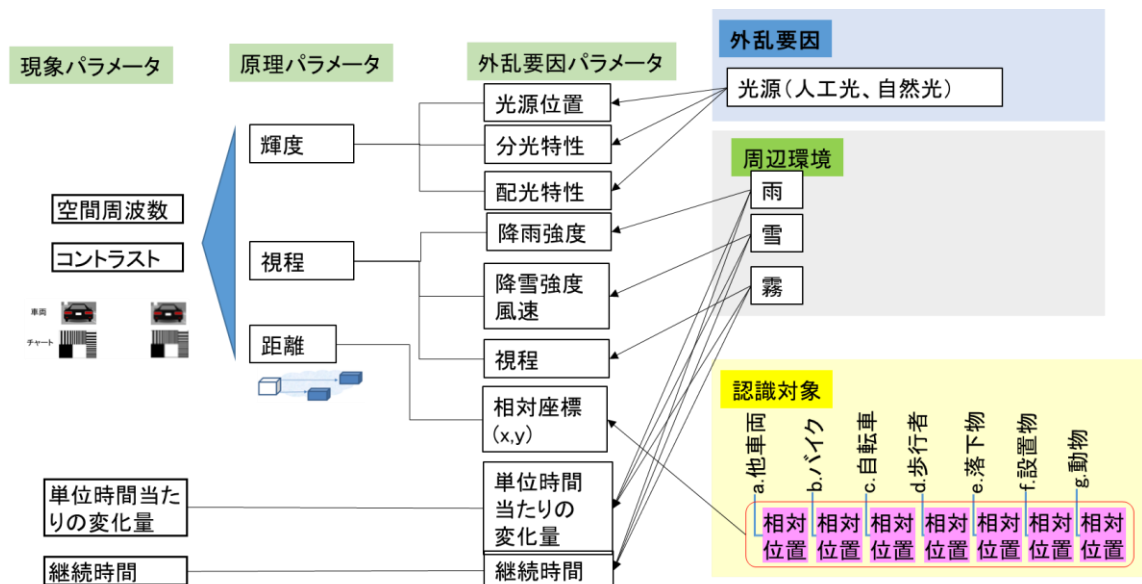
光幕と光源の輝度の比率は、霧の濃度(粒子密度や視程)に応じて一定の関係で変化する。また、光源と背景の輝度比が大きいほど、光幕はより顕著に可視化される。

E.4.2.2 認識外乱の原理と外乱要因との関係

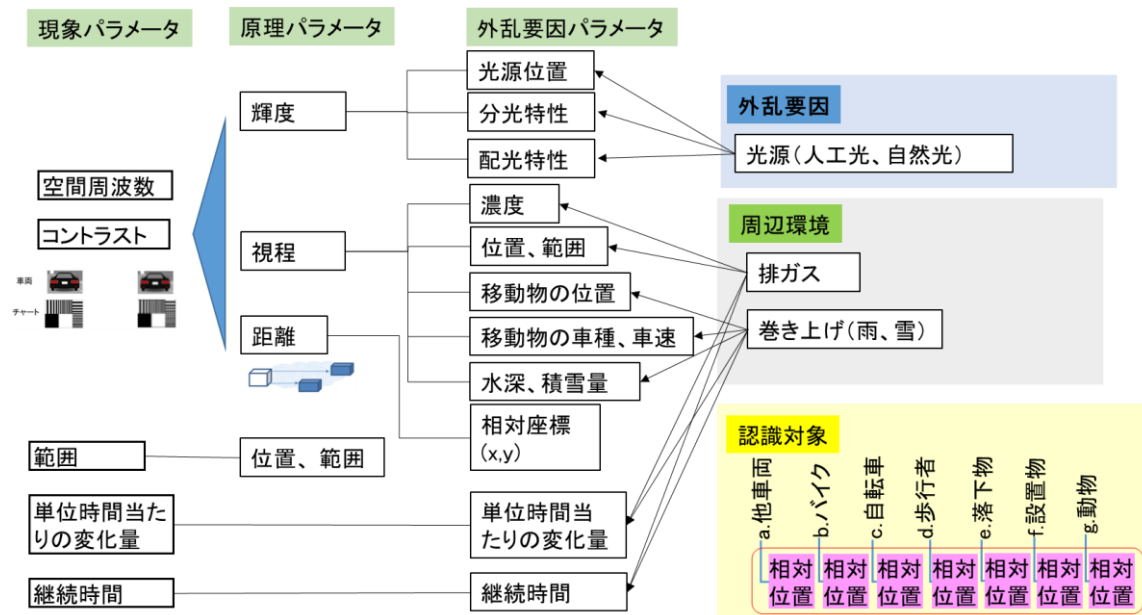
E.4.2.2.1 原理に基づく外乱要因

外乱要因(空間障害物)と外乱要因パラメータを下図に示す。

モード A: 画角内全範囲

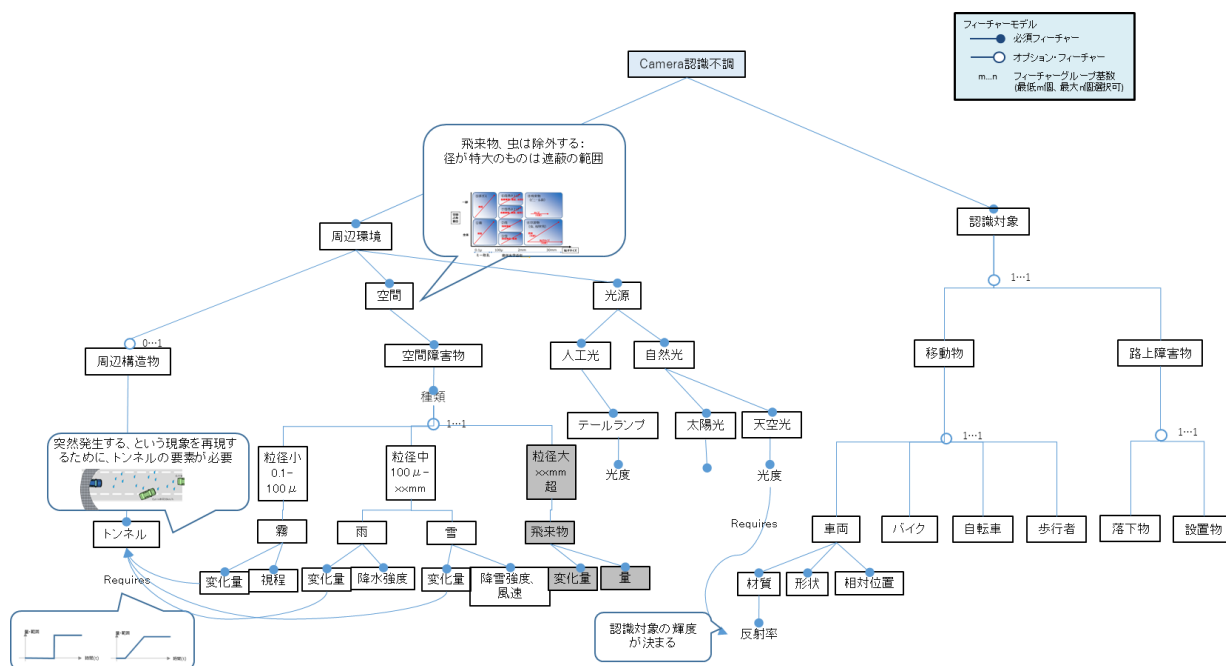


モード B,C:局所的な空間障害物

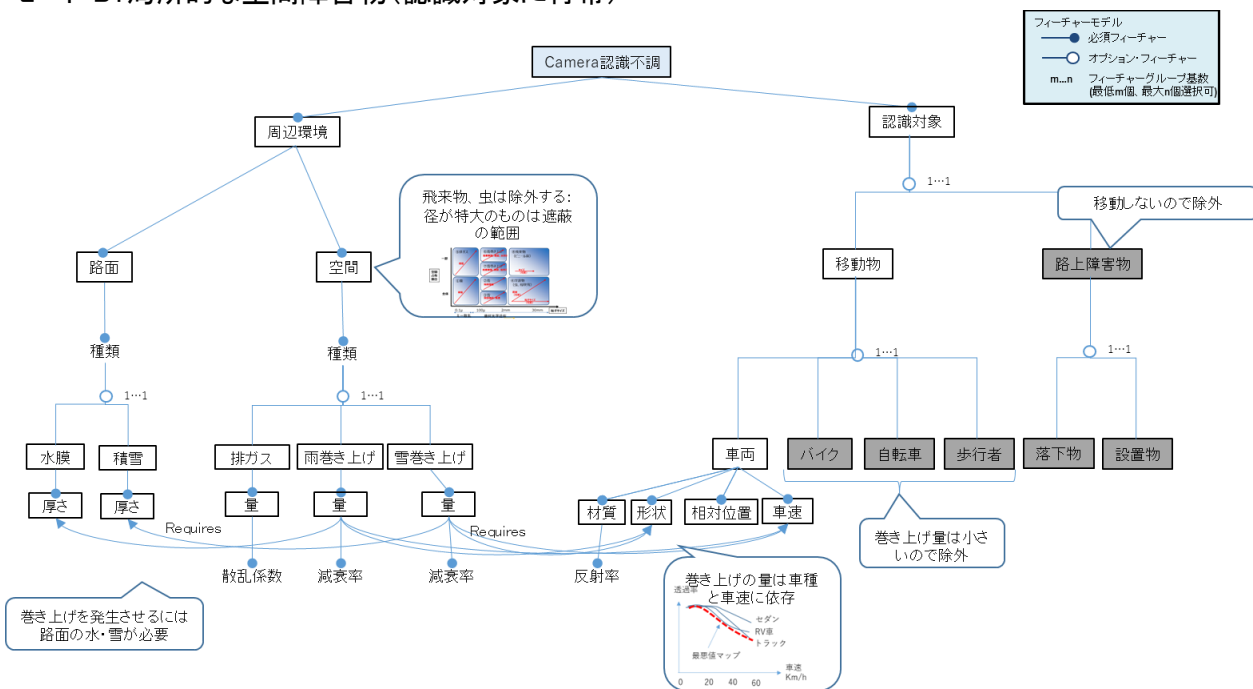


外乱要因を階層化構造で表すと、下図のようになる。

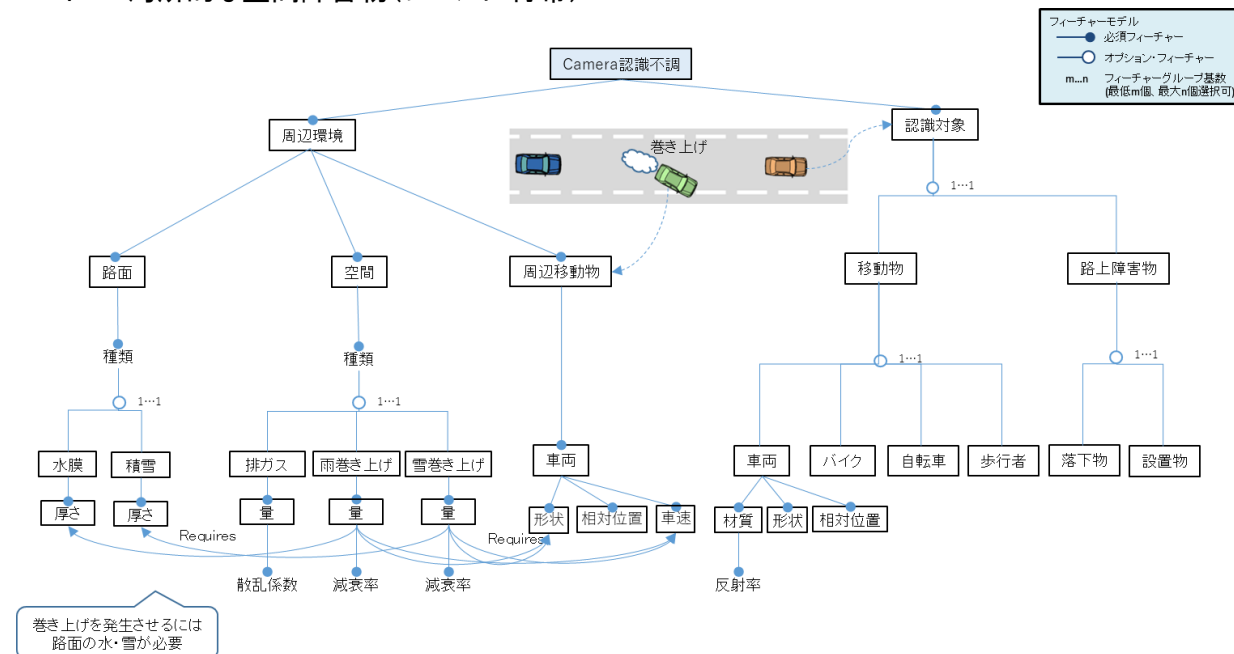
モード A: 画角内全範囲



モード B: 局所的な空間障害物(認識対象に付帯)



モード C: 局所的な空間障害物(レーンに付帯)



E.4.2.2.2 パラメータ範囲

各外乱要因パラメータの範囲を下表に示す。

現象パラメータ	原理 パラ メータ	外乱 要因 パラ メータ	外乱 要因	パラメータ範囲 ODD境界まで	条件		根拠
					STEP1	STEP2	
空間周波数 コントラスト	視程	視程	霧	ODD境界[m]～無 限[m]			
		降雨 強度	雨	0～ODD境界 [mm/h] (50[mm/10min])	30, 50, 80[mm/h]		
		降雪 強度 風速	雪	0～ODD境界 [mm/h] 0～ODD境界[m/s]			交通規制がかかる基準 まで
	距離	相対 座標	認識対象： 相対位置	交通流シナリオ参照			
単位時間当たりの変化量				∞ ※トンネル出口や 急な天候変化を想 定			現実的な最悪値(最大 変化量)の定義が困難 なため、まずは∞とする
継続時間				持続的			継続するほうが厳しい

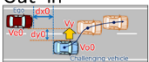


＜認識対象物の考え方＞

背景と類似した色の認識対象物が、低コントラストとなるため、より厳しい条件となるアスファルト、コンクリート(黒、グレー)、雪(白)を背景とし、認識対象物の色も同色を設定する。

種類	パラメータ
車両	【色(ボデーカラー)】 黒、グレー、白
バイク	【色(ボデーカラー、ライダー服)】 黒、グレー、白
自転車	【色(ライダー服)】 黒、グレー、白
歩行者	【色(服)】 黒、グレー、白
設置物	一般的に目立つ色のため低コントラストにはなりにくい。 車線の区切りに現れる矢印板とセーフティーコーンを対象とする
落下物	【色】 高さ15cm超で、落下物件数で上位となる 黒(タイヤ) 自動車部品のタイヤを対象
動物	ロードキルは落下物に包含

E.4.2.2.3 評価シナリオ

ALKS シナリオと外乱要因を紐づけて、Functional Scenario を導出する

Functional Scenario	ALKSシナリオ	走路			交通情報			移動物			路上障害物			考え方
		区画線	構造物	ロードエッジ	信号	標識	路面標示	他車	バイク	自転車	歩行者	落下物	設置物	
F-1	Cut-in 							○	○					空間障害物により、カットインする移動物が見つづらくなるケースを評価
F-2	Cut-out 							○	○	○	○			空間障害物により、急に現れる静止物もしくは移動速度の小さいものが見つづらくなるケースを評価
F-3	Deceleration 							○	○					空間障害物により、急減速する先行車が見つづらくなるケースを評価
F-B1-14	Lane Keep	○												空間障害物により、区画線が見つづらくなるケースを評価

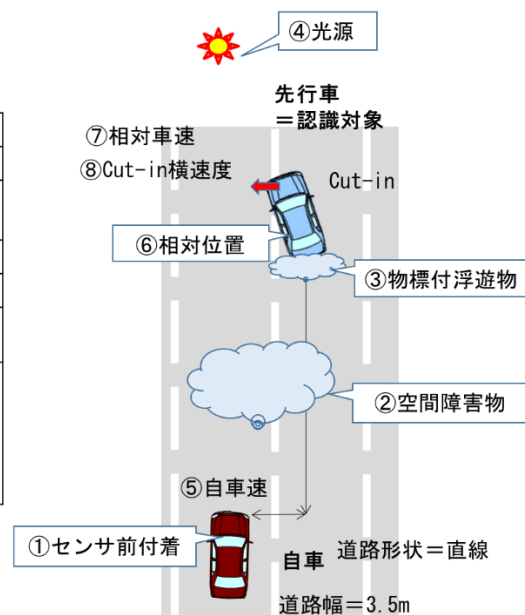
実環境においては外乱要因の組み合わせが発生する。以下にフィーチャーモデルから抜粋した組み合わせを示す。

雨に伴うセンサ前雨滴付着は「屈折」の原理で扱われるものであるが、共連れで発生するためここでも記載する（空間障害物は同時発生もありうるが、ここでは排他として扱う）。

シナリオNo.	車両・センサ		周辺環境						補足	モード
	センサ前		空間障害物			物標に不随		光源		
	雨滴(屈折)	雪(遮蔽)	霧	雨	雪	巻き上げ	排ガス			
01	×	×	○	×	×	×	×	昼		A
02	×	×	○	×	×	×	×	夜		A
03	×	×	○	×	×	○	×	昼		A,B
04	×	×	○	×	×	○	×	夜		A,B
05	○	×	×	○	×	○	×	昼		A,B,(C)
06	○	×	×	○	×	○	×	夜		A,B,(C)
07	○	×	×	○	×	×	×	昼	05がより厳しい	A,(C)
08	○	×	×	○	×	×	×	夜	06がより厳しい	A,(C)
09	×	○	×	×	○	○	×	昼		A,B,(C)
10	×	○	×	×	○	○	×	夜		A,B,(C)
11	×	○	×	×	○	×	×	昼	09がより厳しい	A,B
12	×	○	×	×	○	×	×	夜	10がより厳しい	A,B
13	×	×	×	×	×	○雨	×	昼		B
14	×	×	×	×	×	○雨	×	夜		B
15	×	×	×	×	×	○雪	×	昼		B
16	×	×	×	×	×	○雪	×	夜		B
17	×	×	×	×	×	×	○	昼		B
18	×	×	×	×	×	×	○	夜		B

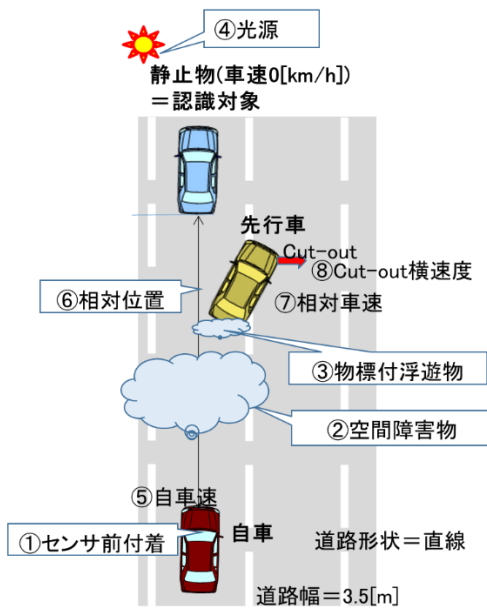
シナリオ F-1: 直線路での Cut-in シナリオ

外乱要因パラメータ	①空間障害物	霧	視程 10[m]~1[km]
		雨	降雨強度 0~ODD境界
		雪	降雪強度 0~ODD境界 風速 0~ODD境界
	③物標付随浮遊物	巻上げ 排ガス	
評価に必要なパラメータ	④光源	昼/夜	
	⑤自車速	交通流シナリオでの 定義範囲のため、 ここでは決めない。	
	⑥相対位置		
	⑦相対速度		
	⑧Cut-in横速度		



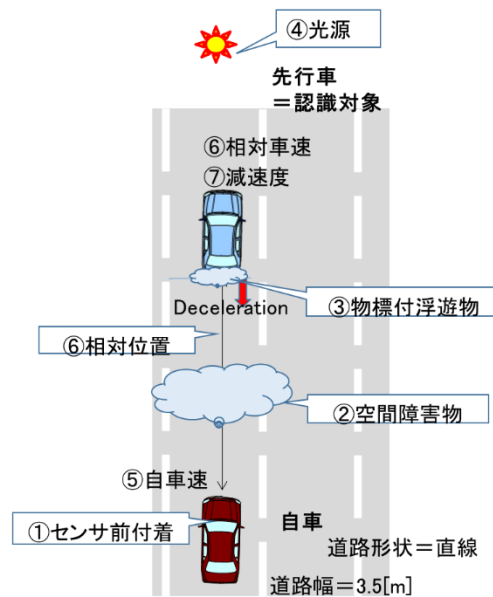
シナリオ F-2: 直線路での Cut-out シナリオ

外乱要因パラメータ	①センサ前付着	雨滴 雪
	②空間障害物	霧 雨 雪
	③物標付随浮遊物	巻上げ 排ガス
	④光源	昼／夜
評価に必要なパラメータ	⑤自車速	交通流シナリオでの定義範囲のため、ここでは決めない。
	⑥相対位置	
	⑦相対速度	
	⑧Cut-out横速度	



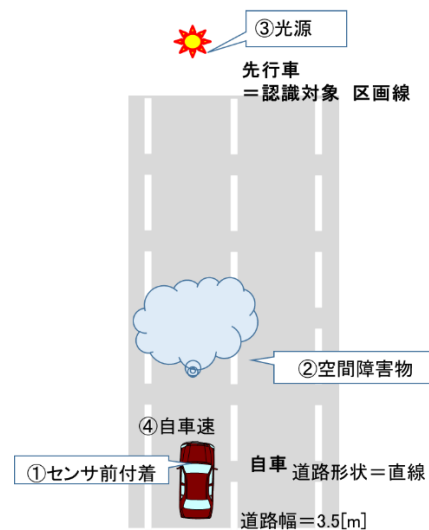
シナリオ F-3: 直線路での Deceleration シナリオ

外乱要因パラメータ	①センサ前付着	雨滴 雪
	②空間障害物	霧 雨 雪
	③物標付随浮遊物	巻上げ 排ガス
	④光源	昼／夜
評価に必要なパラメータ	⑤自車速	交通流シナリオでの定義範囲のため、ここでは決めない。
	⑥相対車速	
	⑦減速度	



シナリオ F-B1-14: 直線路での Lane Keep シナリオ

外乱要因パラメータ	①センサ前付着	雨滴 雪
	②空間障害物	霧 雨 雪
	③光源	昼／夜
	④自車速	交通流シナリオでの定義範囲のため、ここでは決めない。
評価に必要なパラメータ		



E.4.3【カメラ】飽和(過多)、白飛び

E.4.3.1 現象と原理

E.4.3.1.1 現象

カメラの画角内に存在する高輝度領域が、センサの表現可能な輝度範囲(ダイナミックレンジ)の上限を超えると、輝度の差(階調)が再現できなくなり、その部分の画像情報が欠落して False negative(未検知)が発生する。

<事例>

実車ヘッドライトの反射光による
前方車両の白とび

背面が白く光り
ナンバープレートなどの
輪郭がわかりずらくなる



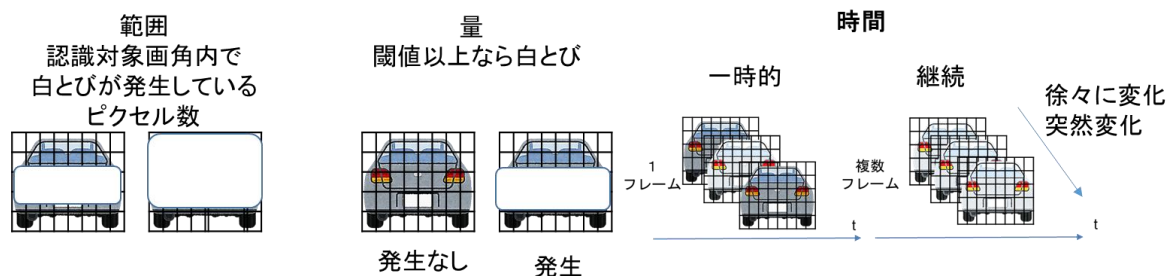
トンネル出口での太陽光による白とび

先行車両の全体が
白くなることで輪郭が
なくなり見えなくなる

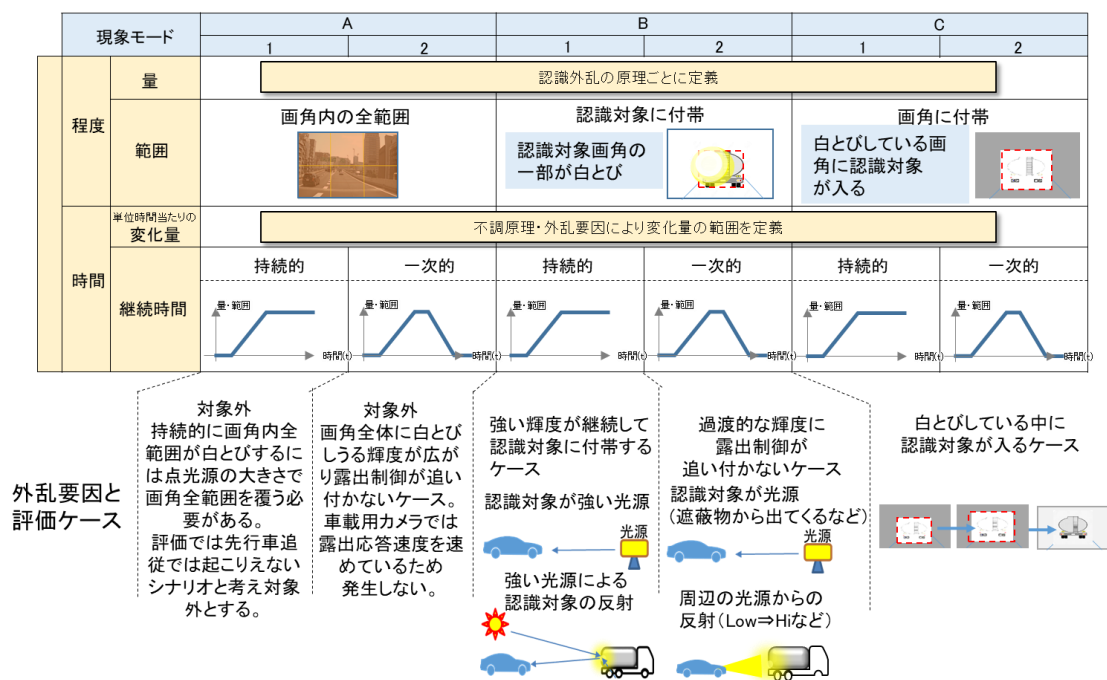


E.4.3.1.2 原理

認識対象の一部に現象が発生している場合、カメラの認識機能が正しく特徴抽出できないことがある。または、特徴抽出ができた場合でも、識別機能において学習データとのマッチングが成立しないことがあり、その結果、未検出または分類誤りに至る。



本原理と現象の関係を整理すると、下図のようになる。

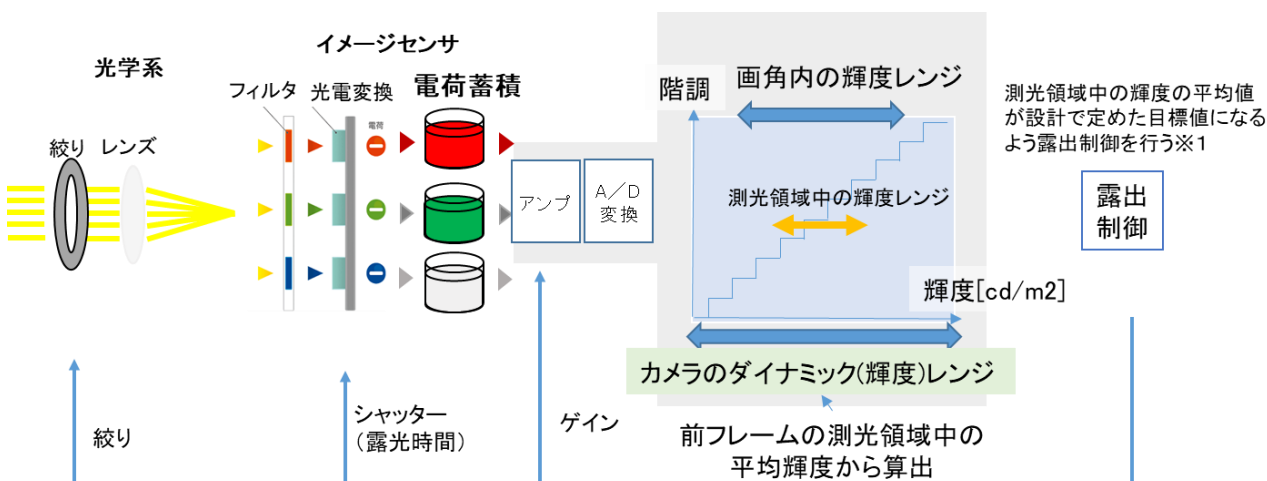


E.4.3.1.3 原理モデル

本項で扱う現象は、被写体(風景)の輝度レンジが露出制御によって調整されたカメラのダイナミックレンジ(輝度レンジ)を上回ることによって発生する。

露出制御は、前フレームにおける測光領域内の平均輝度から目標輝度との偏差を求め、それに基づいて輝度レンジ(絞り値・シャッター速度・ゲインなどの設定値)を決定する。

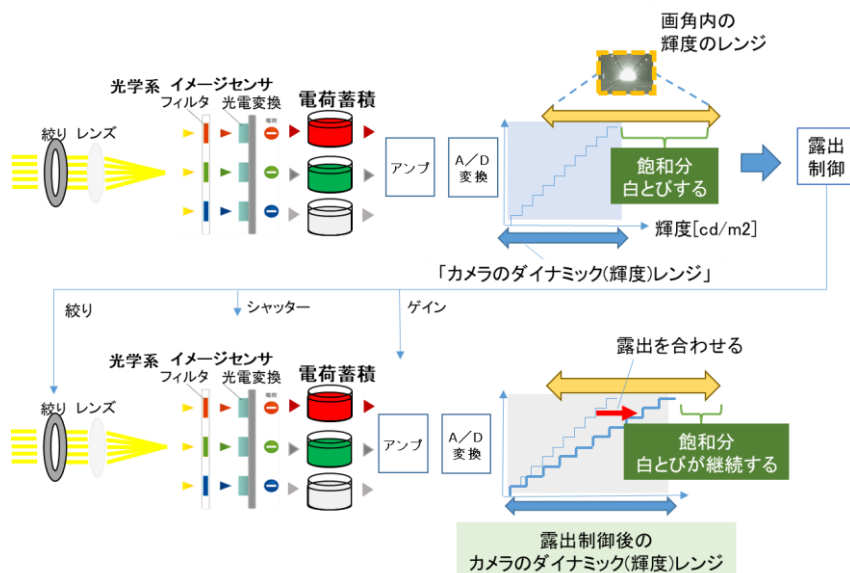
決定された輝度レンジに対して、画角内の輝度分布を割り当てることで、シーン内の明暗差を色および階調として表現する。



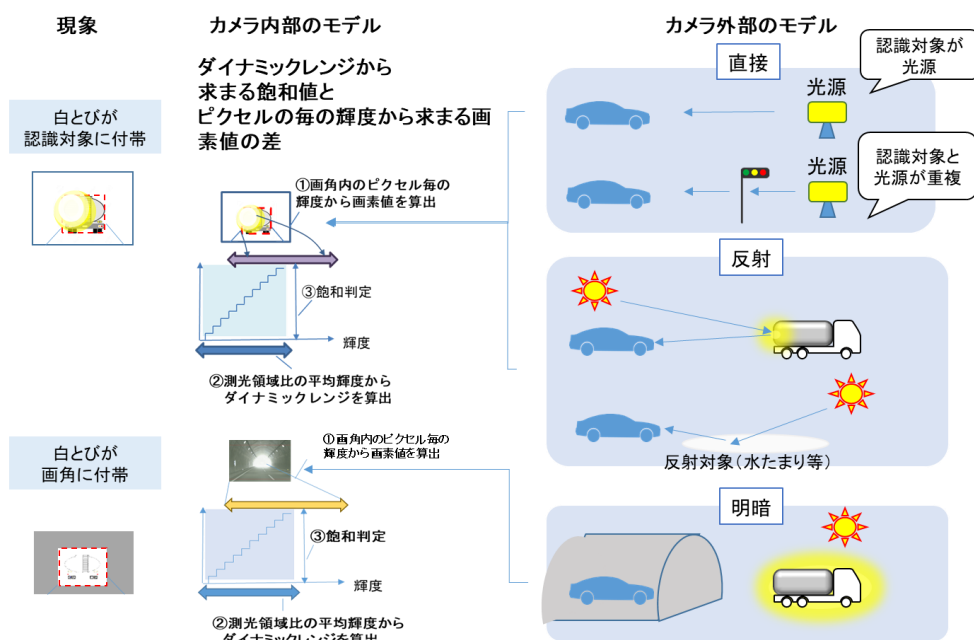
露出制御前(下図の上)は、レンズから入射した光が撮像素子(イメージセンサ)に到達し、RGB 信号としてアンプを経由して A/D 変換される。このとき、画角内の輝度レンジ(明暗差)が、カメラのダイナミックレン

ジ(センサが扱える輝度範囲)を超えると、センサ出力信号が飽和状態に達し、輝度情報が欠落する。飽和した領域では白とびが発生し、明部の階調や形状情報が失われる。露出制御機能は、この状態を検出して次フレームで補正を行う。

露出制御後(下図の下)は、絞り値・シャッター速度・ゲインなどが自動的に調整され、カメラのダイナミックレンジ(輝度レンジ)が入力に合わせて再設定される。これにより、画角内の輝度レンジがセンサのダイナミックレンジ内に収まり、飽和領域(白とび)が抑制され、階調表現が改善される。しかし、光源が極端に強い場合や輝度変動が急激な場合には白とびが継続する可能性がある(下図中の赤矢印部分)。



カメラ内部のモデルと外部のモデルとは、下図のような関係にある。



カメラ内部のモデル

白とびが発生するまでの過程は以下のとおりである。

① 画角内のピクセル毎の輝度から画素値を算出する

画素値(R,G,B) =

ピクセル毎の輝度[cd/m²] × Rt[ms] × G × Wg × E × K

Rt: 露光時間[ms]

G: ゲイン

Wg: ホワイトゲイン(固定値)

E: 光電変換係数(固定値)

K: カラーフィルタ透過率

② 測光領域中の平均輝度からダイナミックレンジを算出する

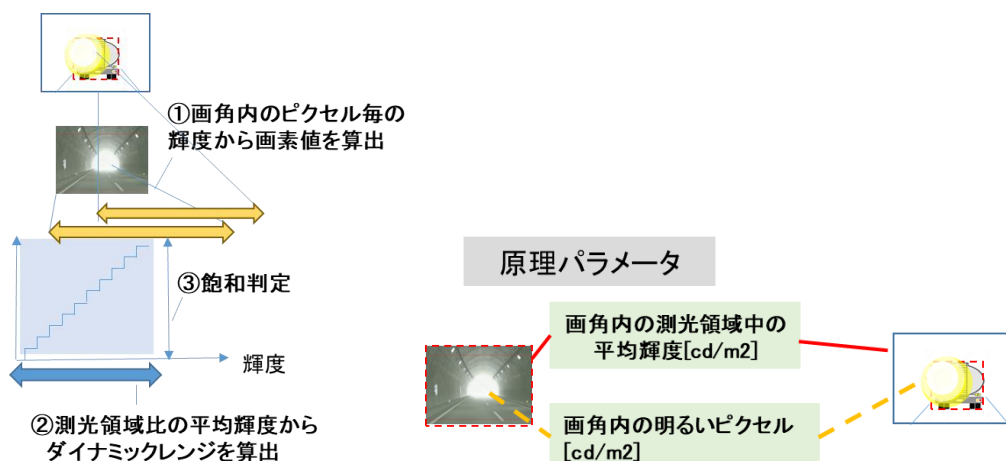
ダイナミックレンジは前フレームの画角内の測光領域中の平均輝度で決まる。

画角内の測光領域中の平均輝度 = $\Sigma \text{画素値} / \text{画素数}$

③ 飽和判定する

ダイナミックレンジごとの飽和値(輝度)より明るいピクセルが白とびする

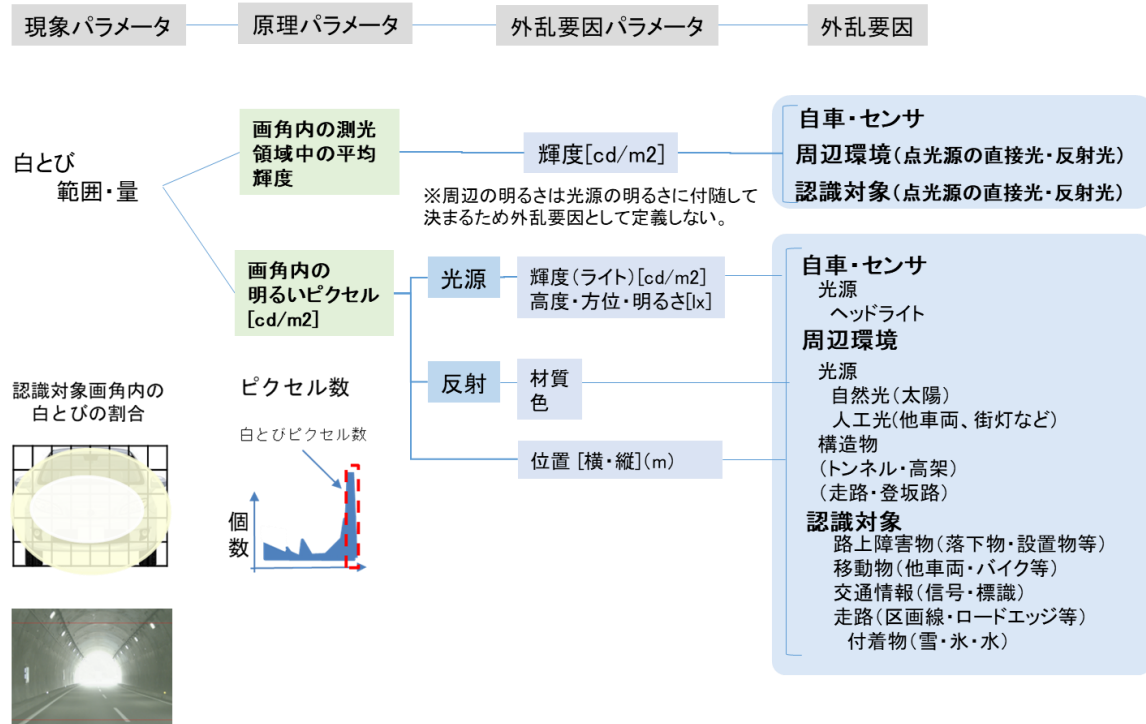
このとき、画角内の明るいピクセル[cd/m²] > 飽和値 となる。



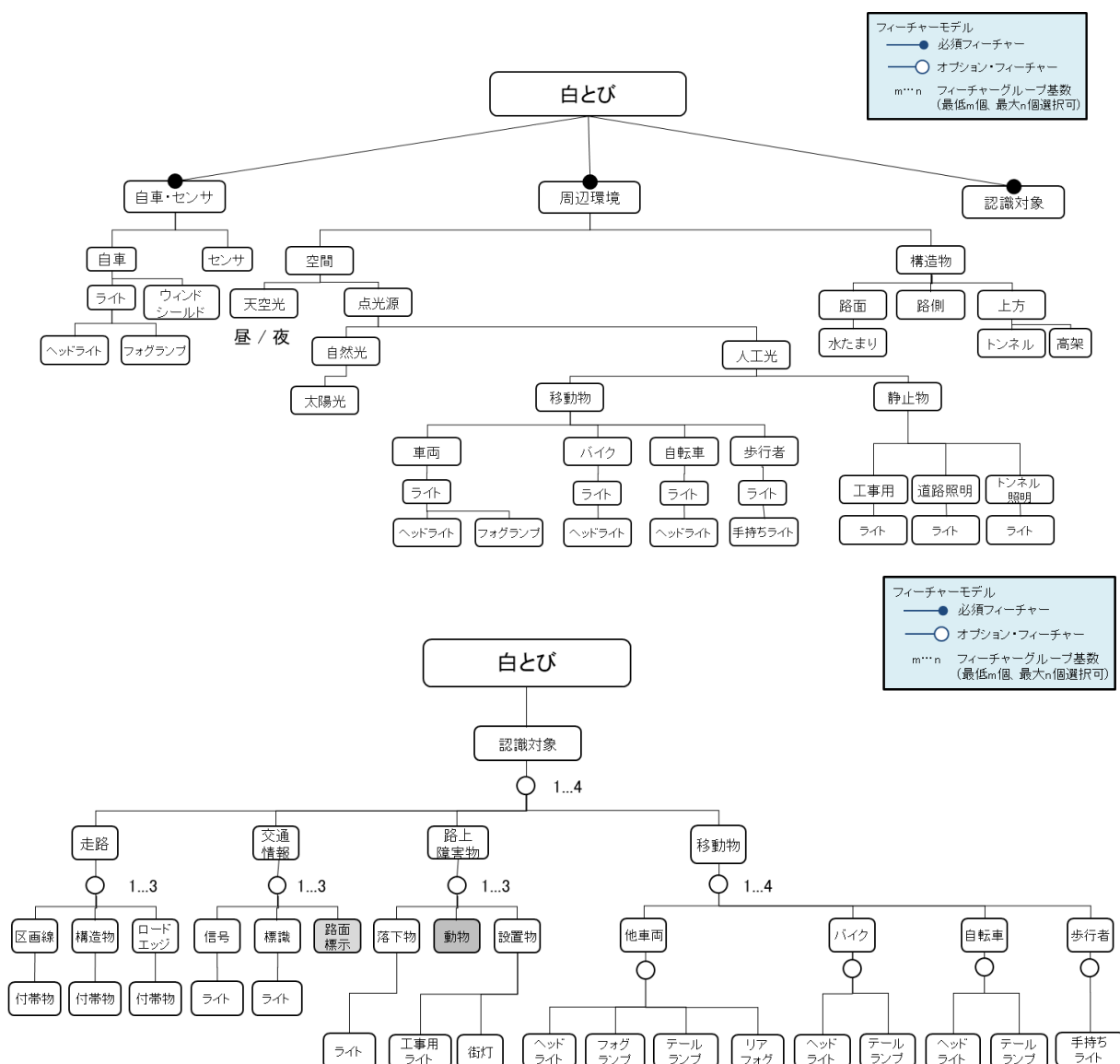
E.4.3.2 認識外乱の原理と外乱要因との関係

E.4.3.2.1 原理に基づく外乱要因

現象パラメータ、原理パラメータ、外乱要因パラメータの関係は以下のようになる。



外乱要因を整理すると、下図のようになる。



E.4.3.2.3 パラメータ範囲

「自車・センサ」に分類される認識外乱については、パラメータ範囲を以下のように設定する。

外乱要因				外乱要因/パラメータ	範囲	根拠(又は理由)
自車	部品	光源	ヘッドライト	明るさ	2灯式 最小 Low 6400[cd] ~ High 15000[cd] ~ 最大 合計 ~43万[cd] 4灯式 最小 Low 6400[cd] ~ High 12000[cd] ~ 最大 合計 ~43万[cd]	車検定められる上下限 道路運送車両の保安基 準の細目を定める告示 〈第三節〉第 198 条 (前照灯等) https://www.mlit.go.jp/jidoshajidosha_fr7_000007.html https://www.tb.mlit.go.jp/kinki/shaken/seibika/seibishunin03-2.pdf
			フォグランプ	明るさ	10000[cd]~	道路運送車両の保安基 準第2章及び第3章の規 定 2005年12月31日までは1 万cdまで 上記以降は規定なし
		ウインドシールド		散乱特性	実車で確認した特性 に合わせる	

「周辺環境」に分類される認識外乱については、パラメータ範囲を以下のように設定する。

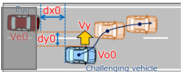
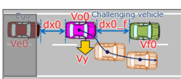
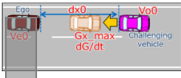
外乱要因				外乱要因 パラメータ	範囲	根拠(又は理由)	
空間	光源	天空光			明るさ	太陽光の明るさ・ライトの 明るさに共連れて決まる	
		点光源	自然光	太陽光	高度	0～90[度]	赤道直下最大高度 まで ※シンガポールで 88.9度
					方位	0～359[度] ※北0[度]、東:90[度]	方位角の最大まで
					明るさ	0～100000[lx]	暦ハンドブック 真夏の太陽の明るさ
			人工光	移動物	明るさ	自車ヘッドライトと同じ	
				静止物	明るさ	0～110000[lm]	工事用ライト 1000W(販売されて いる最大)
構造物	路面	水たまり			反射率	1～100[%]	

「認識対象物」に分類される認識外乱については、パラメータ範囲を以下のように設定する。

外乱要因	外乱要因 パラメータ	範囲	範囲の根拠
車両	色・材質	Camera 可視光 (白)	白とび・フレアが発生しやすい色の端点 (白)
	光源	テールランプ (300[cd])、ブレーキランプ (600[cd])、ハザードランプ (600[cd])、リアフォグ (345[cd])	車検保安基準 128条 テールランプ H18年 1月1日以前 300[cd]以下、以降 5[W]～30[W] 134条 ブレーキランプ H18年 1月1日以降、15[W]～60[W] 41条の3 ハザードランプ H18年 1月1日以降、15[W]～60[W] 37条の2 リアフォグ H18年 1月1日以降、～35[W] ※cd値はテールランプ H18以前と H18以降の 30[W]＝300[cd]と仮定し換算
鏡面反射する車両 (例: タンクローリー)	色・材質	Camera 可視光 (材質: アルミ)	正反射による白とび・フレアが発生しやすい材質の端点 (アルミ)
後端の車幅が狭い車両 (例: バイク、自転車)	色・材質	Camera 可視光 (白)	白とび・フレアが発生しやすい色の端点 (白)
	光源	テールランプ (300[cd])、ブレーキランプ (600[cd])、ハザードランプ (600[cd])	同車両光源
歩行者	色・材質	Camera 可視光 (白、黒、グレー)	白とび・フレアが発生しやすい端点又は背景の雪に溶け込む色: 白
	光源	手持ちライト (20～800[lm])	販売されている手持ちライト

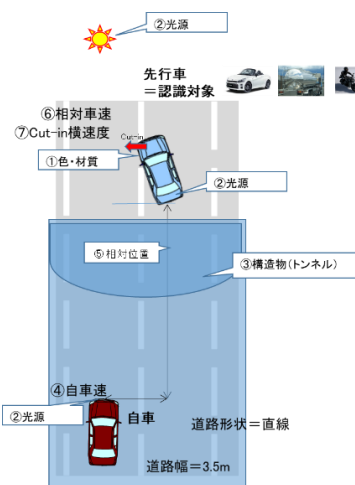
E.4.3.2.3 評価シナリオ

ALKS シナリオと外乱要因を紐づけて、Functional Scenario を導出する。

Functional Scenario	ALKSシナリオ	走路			交通情報		移動物			路上障害物		構造物	考え方						
		区画線	構造物	ロードエッジ	信号	標識	路面標示	他車	バイク	自転車	歩行者	落下物		設置物	動物	上方・トンネル			
F-1	Cut-in						-	-	-	-						○	-		
F-2	Cut-out						-	-	-	-								○	-
F-3	Deceleration						-	-	-	-								○	-
F-B1-14	Lane Keep																○	-	

シナリオ F-1:直線路での Cut-in シナリオ

外乱要因パラメータ	①色・材質	色:白 材質:アルミ
	②光源	自然光 太陽光 人工光 ヘッドライト テールランプ フォグランプ ブレーキランプ
	③構造物	トンネル
評価に必要なパラメータ	④自車速	交通流シナリオでの定義範囲のため、ここでは決めない。
	⑤相対位置	
	⑥相対車速	
	⑦Cut-in横速度	



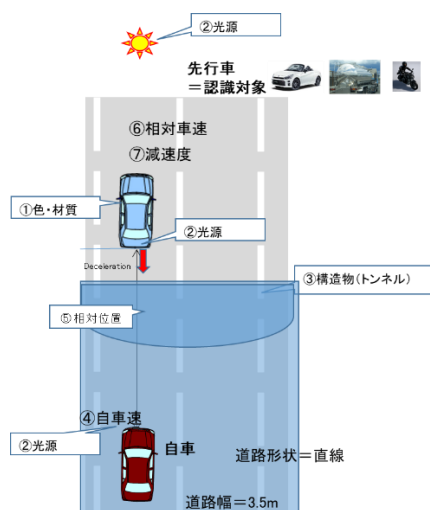
シナリオ F-2:直線路での Cut-out シナリオ

外乱要因パラメータ	①色・材質	色:白 材質:アルミ
	②光源	自然光 太陽光 人工光 ヘッドライト テールランプ フォグランプ ブレーキランプ
	③構造物	トンネル
評価に必要なパラメータ	④自車速	交通流シナリオでの定義範囲のため、ここでは決めない。
	⑤相対位置	
	⑥相対車速	
	⑦Cut-out横速度	



シナリオ F-3:直線路での Deceleration シナリオ

外乱要因パラメータ	①色・材質	色:白 材質:アルミ
	②光源	自然光 太陽光 人工光 ヘッドライト テールランプ フォグランプ ブレーキランプ
	③構造物	トンネル
評価に必要なパラメータ	④自車速	交通流シナリオでの定義範囲のため、ここでは決めない。
	⑤相対位置	
	⑥相対車速	
	⑦減速度 (Deceleration)	



シナリオ F-B1-14: 直線路での Lane Keep シナリオ

外乱要因パラメータ	①光源	自然光 太陽光 人工光 街灯 ヘッドライト
	②路面	水たまり
評価に必要なパラメータ	③自車速	交通流シナリオでの定義範囲のため、ここでは決めない。



Annex F（参考）認識外乱評価用仮想環境の妥当性確認ガイドライン

自動運転車両に限らず、一般の自動車が走行する環境は、晴天で視界の良い状況に限定されるものではない。実際には、雨、霧、降雪など、さまざまな気象条件下での走行が想定される。

このような環境下では、センサによる認識が外乱の影響を受け、性能低下や誤検知といった不調を引き起こす可能性がある。したがって、自動運転の安全性評価においては、これら外乱要因を考慮した評価が不可欠である。

外乱要因を考慮した認識性能の評価手法の一つとして、近年急速に発展している物理モデリングに基づくシミュレーション技術の活用が挙げられる。シミュレーション技術（＝仮想環境）を用いた評価は高い利便性を有する一方で、仮想環境自体の妥当性をどのように確保するかが課題となる。

本 Annex では、Annex E で整理した各センサ（カメラ、ミリ波レーダ、LiDAR）に関し、認識外乱の原理モデルを仮想環境で再現する際に確認すべき要件を整理する。さらに、構築された仮想環境がこれらの要件に対して妥当であるかを検証する方法を提案する。ただし、本 Annex で記載した数値は確定したものではない点には留意が必要である（そのため本 Annex は参考の扱いとした）。

本 Annex で評価の対象とする部位の概略を図 F-1 に示す。

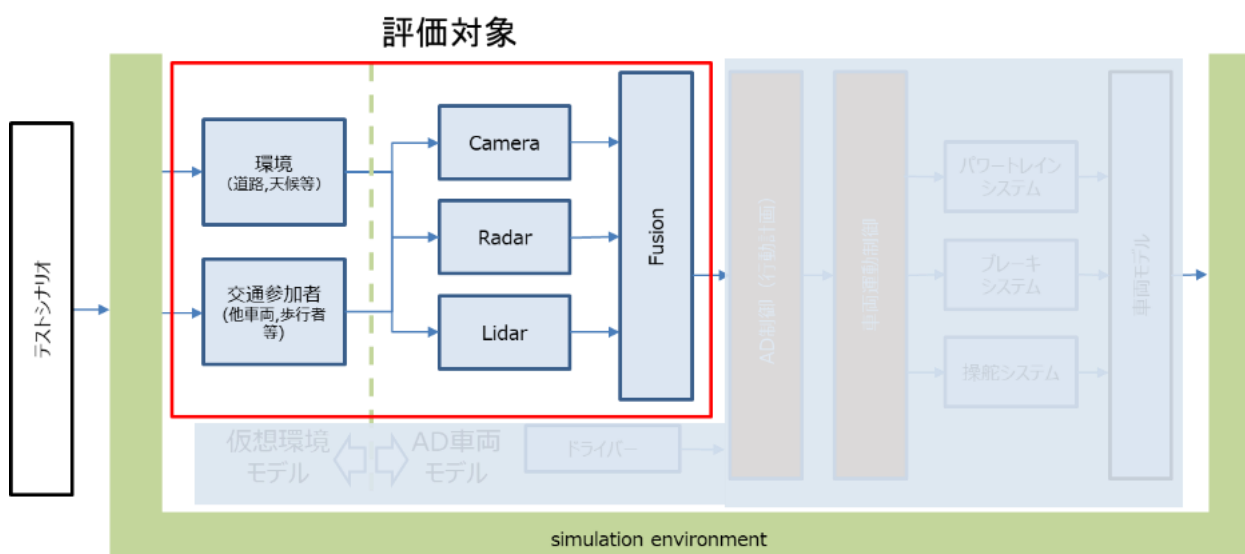


図 F-1. Annex F の評価対象

F.1 本 Annex で定義する要件の全体像

仮想環境による認識性能評価が実用に耐え得るかを判断するためには、その仮想環境に実装されたモデルおよび環境条件の妥当性をどのように検証するかについて、関係各所が共通の認識を持つことが重要である。

最終的な目的は、外乱を付加した際に仮想環境で得られる評価結果が実機での結果と一致することである。ただし、この一致性を定義するためには、その前提条件として、まず外乱のない理想的な環境における一致性の検証方法を明確に定義しておく必要がある。理想的な環境での検証手法を確立しておくことで、最終目的である外乱付加条件下において結果の不一致が生じた際、その要因分析を容易に行うことが可能となる。

本 Annex では、理想的な環境における一致性検証の要件を「A. 共通要件」、外乱を付加した環境における一致性検証の要件を「B. 認識外乱再現要件」としてそれぞれ定義する(図 F-2)。

さらに、「A. 共通要件」および「B. 認識外乱再現要件」に定義された各項目について、それぞれに対応する妥当性検証方法を提案する。

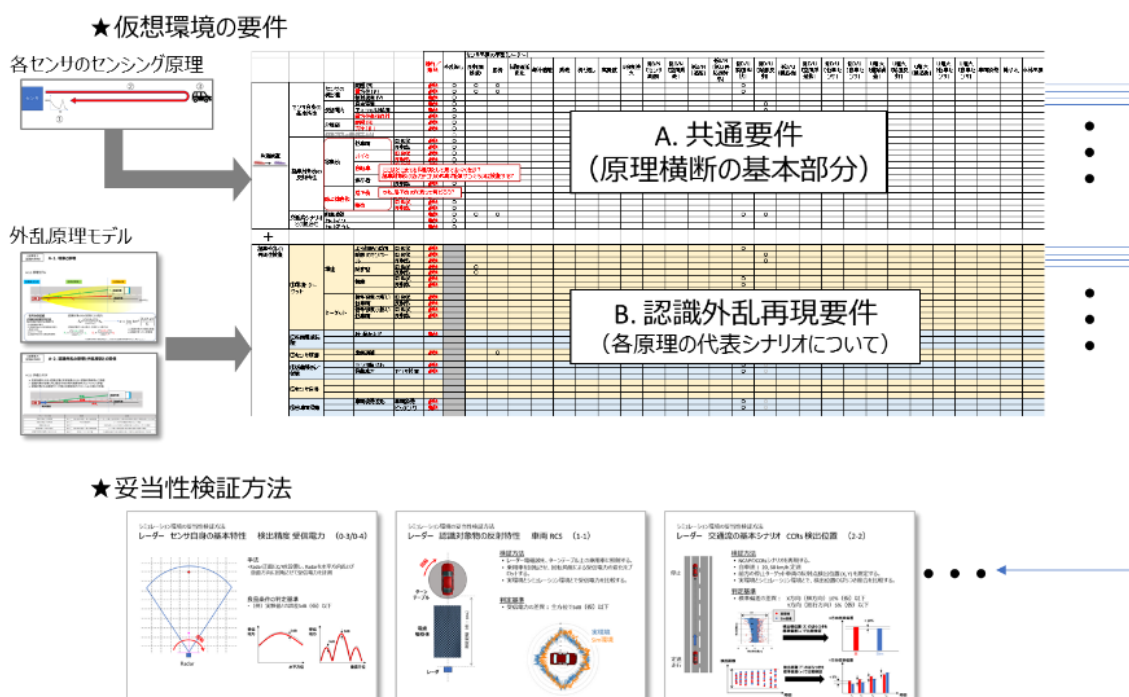


図 F-2. 本 Annex の全体像

A. 共通要件

- 各センサのセンシング原理から、認識外乱の無い状態にて確認すべき要件を定義する。

B. 認識外乱再現要件

- 認識外乱を再現した仮想環境で確認すべき要件を定義する。
- 多岐にわたる認識外乱をその原理に基づいて分類し、各外乱原理についてモデルとして記述することで、認識外乱を再現する際に必要な原理パラメータと外乱要因パラメータを整理する。

F.2 共通要件と妥当性確認方法

本章では、共通要件として確認すべき項目およびそれらの検証方法について解説する。

まず、共通要件として設定すべき項目について、どのような観点で項目を選定するかのを考え方を整理する。次に、この考え方に基づき、センサごとの検証方法を整理する。

これらの検証方法は各センサの原理特性に基づいて設定されるため、センサ原理が異なる場合には、同様の考え方に従って確認項目を整理し、適切に検証を行う必要がある。

なお、本章で整理する検証方法は、同等の内容を検証可能な他の手法によって代替しても差し支えない。また、各センサにおいてキャリブレーション(Calibration)に相当する調整を必要とする場合には、調整を実施した上で検証を行うことを前提とする。

F.2.1 共通要件の考え方

ここでは共通要件として設定する項目について考え方を整理する。認識外乱の要因分類と同様に、①センサ・車両自身、②信号の伝播する空間、③認識対象物 とに分け(図 F-3)、各々について外乱の無い理想的条件において検証すべき項目とその基準値について整理する。また、これらを総合して確認するため、④基本的な交通流シナリオ において認識対象物が認識できるかを検証する方法を定義する。

本節では、共通要件として設定すべき項目の考え方について整理する。

認識外乱の要因分類と同様に、要素を以下の三つに区分する(図 F-3)。

- ① センサおよび車両自身
- ② 信号が伝播する空間
- ③ 認識対象物

各要素について、外乱のない理想的な条件下において検証すべき項目と、その基準値(評価基準)を整理する。さらに、これらの検証項目を総合的に確認するため、④基本的な交通流シナリオ を用いて、認識対象物が適切に検知・認識できるかを検証する方法を定義する。

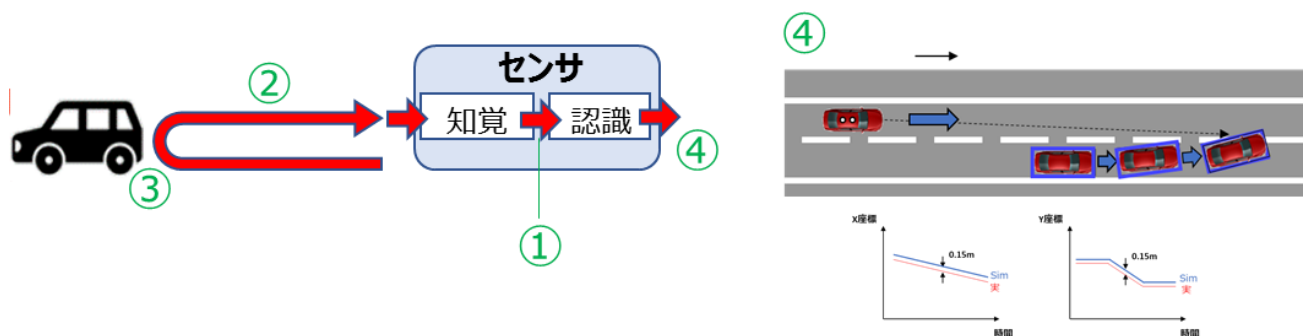


図 F-3. 共通要件の設定部分

- ① センサ自身の基本特性:
外乱のない理想的な環境において、センサ自身の基本的な知覚特性(距離、方位、相対速度、受信強度など)が適切に再現されているかを確認する。
対象とする項目および条件は、各センサの原理特性により異なる。
- ② 伝搬特性・光学特性など:
空間の持つ特性として、外乱のない理想的な環境において、認識対象物からセンサまでの信号伝搬過程(電波伝搬、光学的透過・反射など)が適切に再現されているかを確認する。

- ③ 認識対象物の反射特性など：
認識対象物の見え方(＝センサによる知覚のされ方)が理想的環境下で正しく再現されているかを確認する。ここでは、知覚結果そのものに加え、得られたデータに基づく物体認識結果についても検証を行う。
- ④ 交通流シナリオ下でのターゲット認識：
基本的な交通流シナリオ(ここでは本文に示す Following、Cut-in、Cut-out を指す)において、ターゲット認識結果が再現されているかを確認する。

F.2.2 各センサにおける共通要件の考え方

F.2.2.1 ミリ波レーダについての共通要件の考え方

ミリ波レーダでは、その知覚の原理から、距離・方位・相対速度と、受信電波強度などの物理量が再現されているかどうかを検証する。図 F-4 は、どのようにこれらの情報を取得するかを、信号処理の観点から示す。

- 距離: 送信波が対象物に当たって反射し、再びレーダに戻るまでの往復時間から距離を求める(図 F-4 左上)
- 相対速度: 走行中の車両など、対象物が移動している場合、反射波にはドップラー効果による周波数変化が生じます。その周波数差から、対象物との相対速度が算出される(図 F-4 左下)
- 方位: 受信アンテナを複数配置し、それぞれで受信される位相差を解析することで、対象の方位角を求める(図 F-4 右上)
- 受信電波強度: 対象物の材質や形状、表面反射特性などにより、受信信号の強度(反射エネルギー量)が変化する。図 F-4 左下の「受信強度」グラフでは、距離方向に対する信号強度の分布を示しており、このピーク位置と高さから対象物の検出および反射特性を判断する

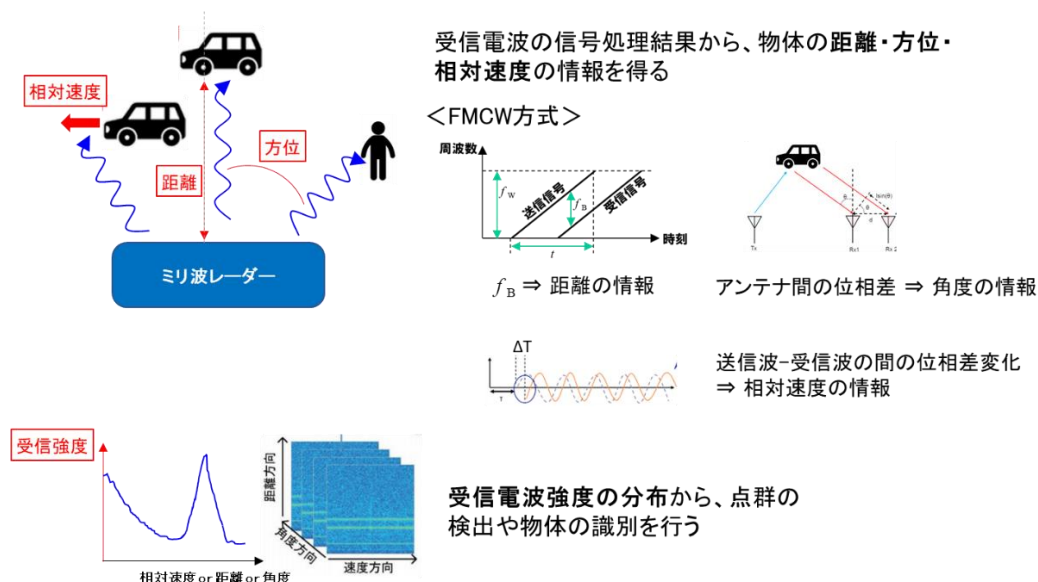


図 F-4. ミリ波レーダの検出原理

この考え方から具体的な要件を整理したものを表 F-1 に示す。

表 F-1. ミリ波レーダにおける共通要件一覧

				知覚起因																				
				認識対象からの信号S										認識対象を阻害する信号										
				周波数	位相		強度				ノイズ(N)				不要信号(U)									
					到来方向変化	伝搬遅延変化	Sなし(部分的)		S強すぎ		S強度差大	低S/N				低D/U						U増大		
項目	パラメータ	要求内容	妥当性 検証方法 No.	外乱無し	反射(間接波)		屈折	部分遮蔽	折返し	高調波		方位角変化による低S/N (縦/横方位角変化)	センサ表面での減衰による低S/N	空間減衰による低S/N	低い再帰反射率による低S/N	方位角変化による低D/U (垂直/水平方位角変化)	路面反射による低D/U	構造物による低D/U	空間浮遊物による低D/U	他車センサによる低D/U	自車の他センサによる低D/U	路面反射によるU増大		
共通の 基本検証	センサ自身の 基本特性	検出精度	距離 (R)	距離	C/Rの設置位置を、実環境と同等に検出できること	0-1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
			水平方位 (θ)	水平方位			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
			垂直方位 (φ)	垂直方位			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
			相対速度 (V)	距離	C/Rの相対速度を、実環境と同等に検出できること	0-2	○	○																
		受信電力 (P)	垂直方位	C/R反射波の電力を、実環境と同等に受信できること、またサイドロブが実環境と同等に再現できること	0-3	○	○			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
			水平方位			○	○			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		分解能	距離 (R)	距離	2つのC/Rを近接設置した際の最小分解能が、実環境と同等であること	0-4	○	○																
			水平方位 (θ)	水平方位			○	○																
			垂直方位 (φ)	垂直方位			○	○																
			相対速度 (V)	相対速度	2つのC/Rを異なる速度で移動させた際の最小	0-5	○	○																
		分離能	距離 (R)	距離	2つのC/Rを近接設置した際の最小分離能が、実環境と同等であること	0-6	○	○						○										
			方位 (θ)	水平方位			○	○						○										
	縦方位 (φ)		垂直方位		○		○						○											
	電波伝搬特性	自由空間	受信電力 (P)	距離	C/Rの設置距離を変化させた際の受信電力の距離変化が、実環境と同等であること、またノイズフロアが実環境と同等に再現できること	0-7	○				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		路面上	受信電力 (P)	距離		0-8	○				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	認識対象物の 反射特性	車両(乗用車)	RCS	角度	乗用車のRCSが、全周囲において実環境と同等であること	1-1	○																	
			反射点	角度	乗用車からの反射強度ピーク値が、実環境と同等であること	1-2	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
				距離	乗用車からの反射強度ピーク値が、実環境と同等であること	1-2	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		車両(大型車)	RCS	角度	大型車のRCSが、全周囲において実環境と同等であること	1-1	○																	
			反射点	角度	大型車からの反射強度ピーク値が、実環境と同等であること	1-2	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
				距離	大型車からの反射強度ピーク値が、実環境と同等であること	1-2	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	歩行者	RCS	角度	歩行者のRCSが、全周囲において実環境と同等であること	1-3	○																		
	交通流の基本 シナリオ	CCRs	受信電力	距離	乗用車からの受信電力が、実環境と同等であること	2-1	○																	
			受信信号の検出位置 (距離/方位)	時間	乗用車からの受信信号の検出位置が、実環境と同等であること	2-2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
			受信信号の検出速度	時間	乗用車からの受信信号の検出速度が、実環境と同等であること	2-3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
			オブジェクト検出位置 (距離/方位)	時間	乗用車のオブジェクトとしての検出位置が、実環境と同等であること	2-4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
			オブジェクト検出速度	時間	乗用車のオブジェクトとしての検出速度が、実環境と同等であること	2-5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		カットイン (乗用車)	オブジェクト検出位置 (距離/方位)	時間	乗用車のオブジェクトとしての検出位置が、実環境と同等であること	2-6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
			オブジェクト検出速度	時間	乗用車のオブジェクトとしての検出速度が、実環境と同等であること	2-7	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		カットイン (大型車)	オブジェクト検出位置 (距離/方位)	時間	大型車のオブジェクトとしての検出位置が、実環境と同等であること	2-6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
			オブジェクト検出速度	時間	大型車のオブジェクトとしての検出速度が、実環境と同等であること	2-7	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		カットアウト	オブジェクト検出位置 (距離/方位)	時間	乗用車のオブジェクトとしての検出位置が、実環境と同等であること	2-8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
オブジェクト検出速度	時間		乗用車のオブジェクトとしての検出速度が、実環境と同等であること	2-9	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	

全て対象

全て対象

本図は縦軸に確認項目、横軸に関連する認識外乱要因を並べ、関連する項目に○を付けている。これにより外乱再現性検証において不一致が発生した際に、外乱再現の問題かセンサ共通要件の問題かを切り分けられると考える。

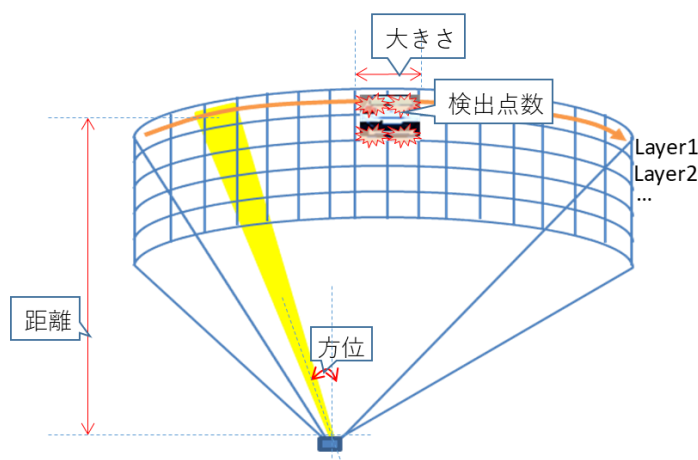
F.2.2.2 LiDAR についての共通要件の考え方

LiDAR では、その知覚の原理から、距離・方位・強度・検出点数・大きさなどの物理量が再現されているかどうかを検証する。図 F-5 は、LiDAR が生成する点群データ(Point Cloud)の構造と、距離検出原理を模式的に示す。

- 角度の検出: LiDAR は回転ミラーや MEMS スキャナなどを用いて、一定の角度範囲(水平・垂直方向)にレーザー光を走査します。図 F-5 左では、半円状の領域が描かれており、これは LiDAR の視野角(FOV: Field of View)を示している。この範囲内で、LiDAR は高速にレーザーを照射・受信し、環境全体を格子状の点群データとして取得する。図の中央上部にある「検出点数」は、LiDAR が 1 回のスキャンで取得する点群の密度(点数)を示しており、検出点数は、走査分解能(角度ステップ)、回転速度、反射率などにより決定される。図の黄色い扇形は、LiDAR の走査方向(スキャンライン)を示しており、走査角度(角度分解能)は、空間分解能に直結し、障害物の形状再現や小物体の検出性能に影響する。ビームは垂直方向にも多層構成(例: 16~128 層)となっており、これにより 3 次元的な検知が可能になる。
- 距離の検出: F-5 右では、LiDAR の基本原理である ToF(Time of Flight)法にて、LiDAR は、送信したレーザー光が対象物に反射して戻るまでの時間差(Δt)を測定し、対象までの距離を算出する。

角度の検出(スキャン型)

各方位ごとに順番にスキャンしながら距離を計測。
スキャンする角度は決まっているため、方位が算出できる。
距離と点数がわかれば物標の大きさが分かる。



距離の検出

パルス状の赤外光を送信し、認識対象にあたって
戻ってくる時間を計測することで距離を測定。
ピークは反射の強度が強いところに現れる。

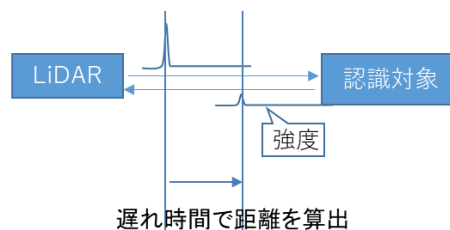


図 F-5. LiDAR の検出原理

この考え方から具体的な要件を整理したものを表 F-2 に示す。

表 F-2. LiDAR センサにおける共通要件一覧

							外乱無し	知覚部																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
								認識対象からの信号													認識対象外からの信号																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
								S強度		S伝搬方向		S速度	N要因		U要因																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
								空間全体の位置ずれ	認識対象の位置ずれ	S飽和	S減衰				遮蔽によるS無し	反射	屈折	Sの到達時間	パルス状のノイズ	DC的なノイズ	多重反射	認識対象外からの信号(反射)	認識対象外からの信号(屈折)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
検証観点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		</

F.2.2.3 カメラセンサについての共通要件の考え方

カメラセンサは、これまでに述べたミリ波レーダや LiDAR のようなアクティブ型センサとは異なり、自己発信信号を持たず、周囲の光を受動的に利用して外界を認識するパッシブ型センサである。そのため、アクティブ型センサとは取得可能な情報の性質が根本的に異なる(図 F-6)。

アクティブ型センサでは、知覚段階において距離情報が信号に直接含まれているのに対し、カメラセンサでは距離情報を知覚段階で取得することはできない。一方で、カメラセンサはレーダや LiDAR では取得できない色情報を得ることができる。

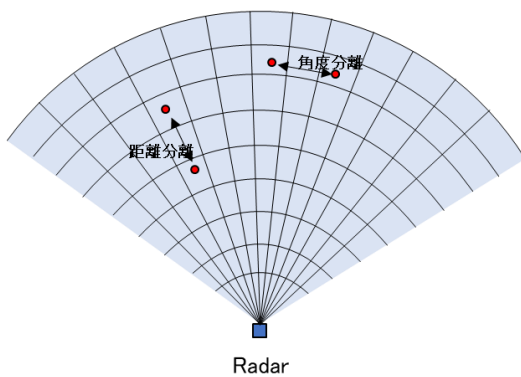
この違いは、カメラセンサが平面上に配置された光学素子(イメージセンサ)を用いて映像を形成するという知覚原理に基づくものである。

したがって、この光学的特性は、カメラセンサにおける一貫性検証において特に重要な要素となる。

知覚部考え方の違い

センサユニットの妥当性検証で確認すべき情報

レーダー

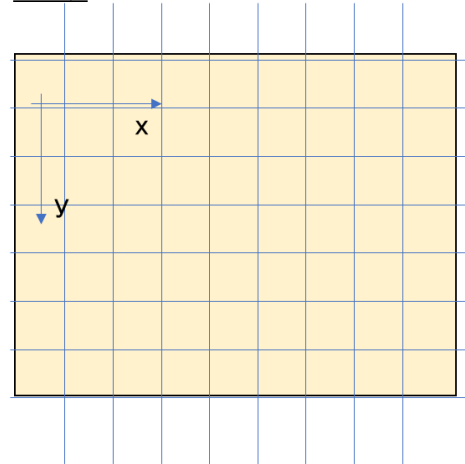


レーダー、ライダーセンサは知覚データに深度(奥行き)情報が含まれる

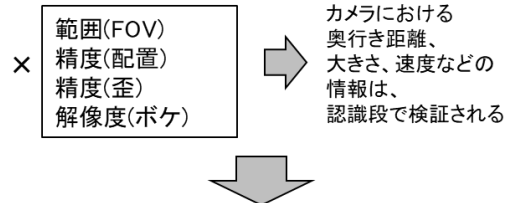
	カメラ	ライダー	レーダー
r(距離)	-	√	√
theta(方位角)	√	√	√
phi(仰角)	√	-	-
v_r(放射方向速度)	-	-	√
信号強さ(輝度(明度))	√	√	√
色味(色相、彩度)	√	-	-

カメラは信号に色味も含まれている

カメラ



カメラセンサの知覚データは画像データとなり、画像上での対象物の形状や距離によるサイズの違いで表される



カメラは対象物の形状の再現性が重要

図 F-6. アクティブ型センサとパッシブ型であるカメラセンサの特徴比較

そのため、カメラでは、距離などの物理量(認識結果)のみならず、画像データ自体についても検証を行う必要がある。

画像データは、以下に示すような各種パラメータにより定義(または生成)される。

- ・ 透過率
- ・ 屈折率
- ・ 光電変換効率
- ・ 画素数

- ・ 画素サイズ
- ・ 歪率
- ・ 焦点距離
- ・ 光軸の向き
- ・ カメラ取付高さ など

本節以降では、検証方法を4分野(単体カメラ／車載カメラ／アセット／シナリオ)、および6段階(レベル0～5)に区分して記載する。

ここで示す各検証方法に定義される項目の組合せは、後述の「表 F-6: カメラセンサにおける認識外乱再現要件一覧」と照合しながら、想定するカメラ仕様を考慮して各パラメータ値を調整する必要がある。

なお、カメラは車載時において、取付誤差やウインドシールドの光学的影響を他のセンサよりも大きく受ける傾向がある。このため、本検証の前段として、エーミング(Aiming)およびキャリブレーション(Calibration)に関する項目を明示的に設定するものとする。

このような特性を考慮すると、カメラセンサの知覚部について共通要件を図 F-7 のように整理できる。

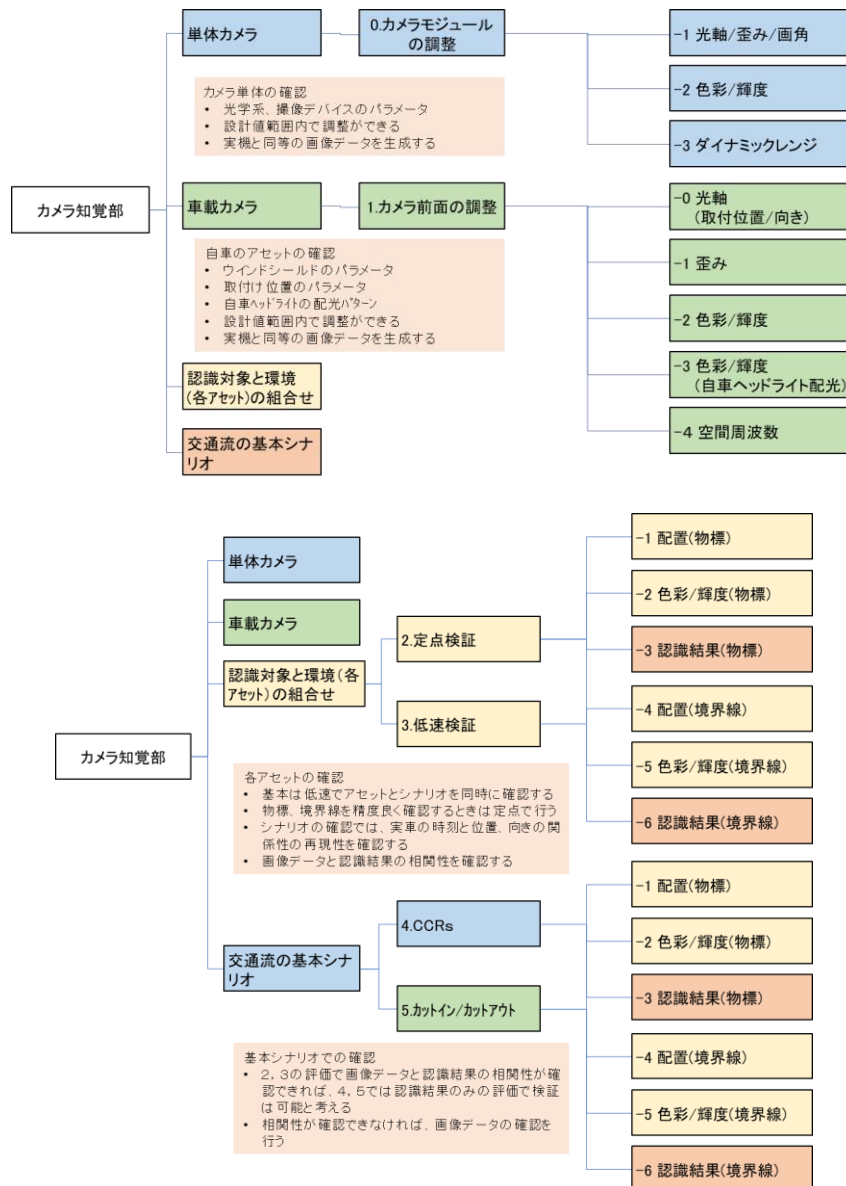


図 F-7. カメラセンサ(知覚部)の共通要件

同様にカメラセンサの認識部については以下となる。

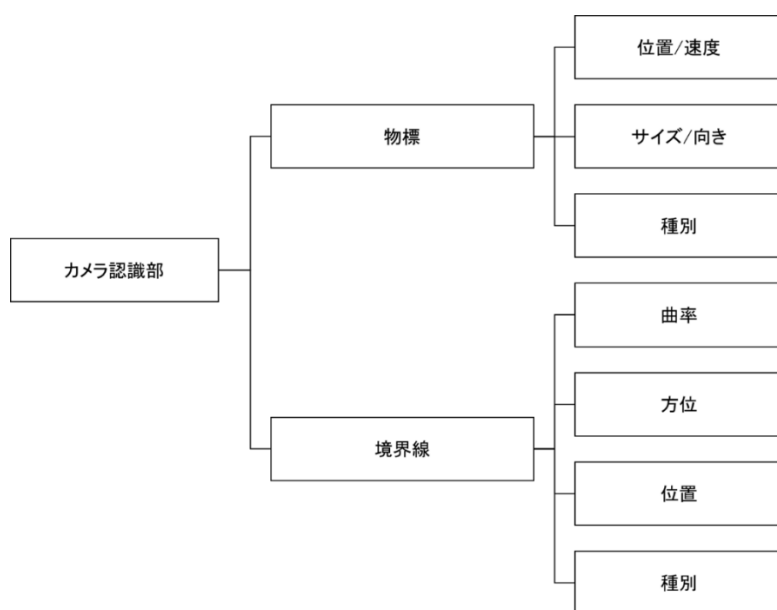


図 F-8. カメラセンサ(認識部)の共通要件

この考え方から具体的な要件を整理したものを表 F-3 に示す。

F.2.3 共通要件の妥当性確認方法

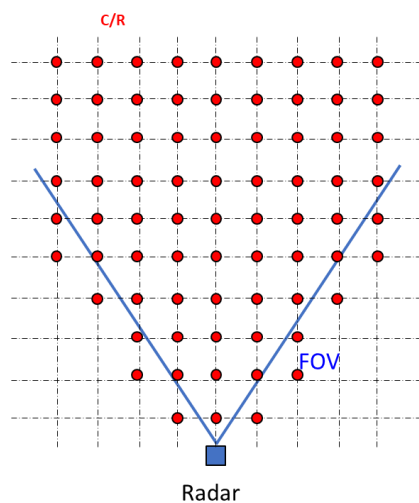
各センサについて、F.2.2 で定義した各要件項目の検証方法を記述する。

F.2.3.1 ミリ波レーダの共通要件の妥当性確認手法

F2.3.1.1 センサ自身の基本特性: 検出精度 距離・方位

検証方法

- ・ FOV 内の各点におけるコーナリフレクタ(C/R)の検出位置をレーダで取得 (コーナリフレクタ(C/R)は1箇所ずつ移動)
- ・ 実環境とシミュレーション環境とで検出位置(距離・方位)を比較する



Trihedral Corner Reflector (C/R)
・RCSが既知
・再帰反射特性

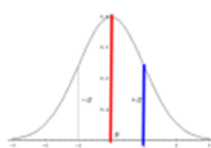
出典) <https://www.everythingrf.com/community/what-is-a-corner-reflector>

判定基準

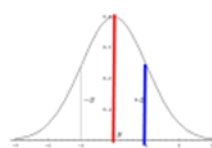
実環境での検出結果(距離・方位)の統計値に対して

中央値 : 5%以内

分散(σ) : 10%以内



実測の統計値

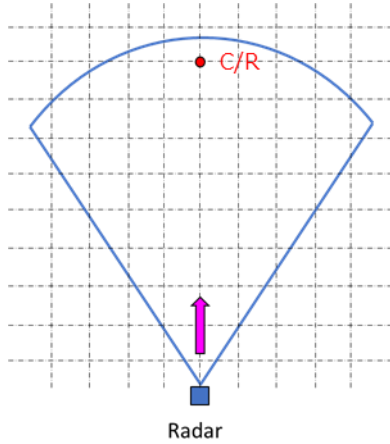


Sim.の統計値

F.2.3.1.2 センサ自身の基本特性:検出精度 相対速度

検証方法

- ・ Radar 正面にコーナリフレクタ(C/R)を設置し、コーナリフレクタ(C/R)に向かって Radar を一定速度で移動
- ・ 実環境とシミュレーション環境とで検出速度を比較する

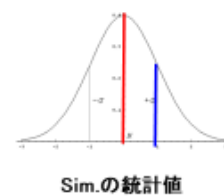
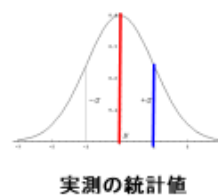
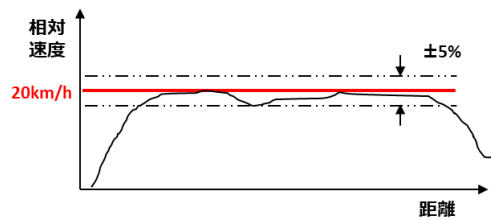


判定基準

実環境での検出結果(距離・方位)の統計値に対して

中央値 : 5%以内

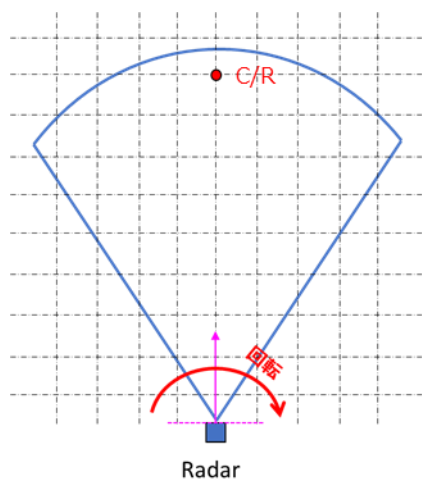
分散(σ) : 10%以内



F.2.3.1.3 センサ自身の基本特性:検出精度 受信電力

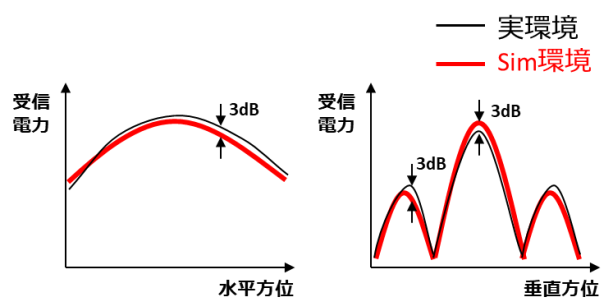
検証方法

- ・ Radar 正面にコーナリフレクタ(C/R)を設置し、Radar を水平方向および垂直方向に回転させて受信電力を計測



判定基準

受信電力の差異:3dB 以下

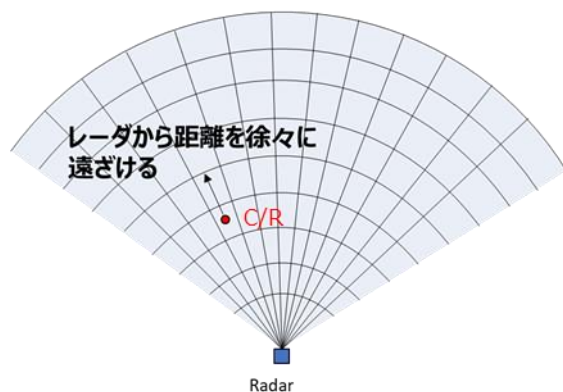


F.2.3.1.4 センサ自身の基本特性:検出精度 分解能 距離・方位

<距離分解能>

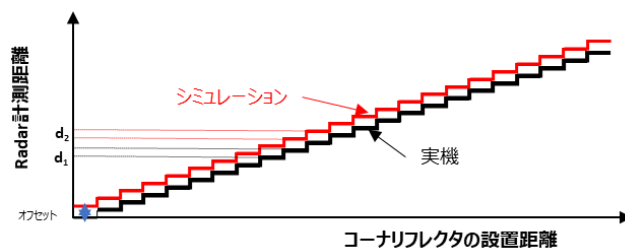
検証方法

Radar の FOV 内にコーナリフレクタ(C/R)設置、レーダから法線上に離反する方向に徐々に距離を変化させ距離分解能を検証



判定基準

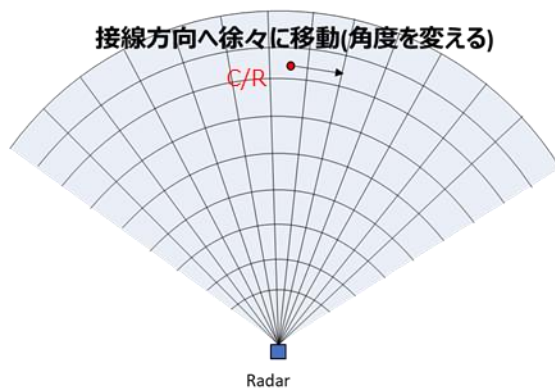
- ・ コーナリフレクタ(C/R)設置距離と Radar 計測距離の関係より導出される階段のステップ数が実機とシミュレーションで一致すること
- ・ ステップの大きさ d_1, d_2 の大きさに 15%以上の開きがないこと



<横方位分解能>

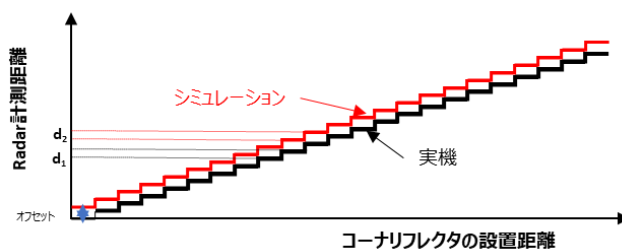
検証方法

Radar の FOV 内にコーナリフレクタ(C/R)設置、接線方向へ徐々に移動させレーダが計測する角度とコーナリフレクタ(C/R)設置各を比較することで横方位角度分解能を検証



判定基準

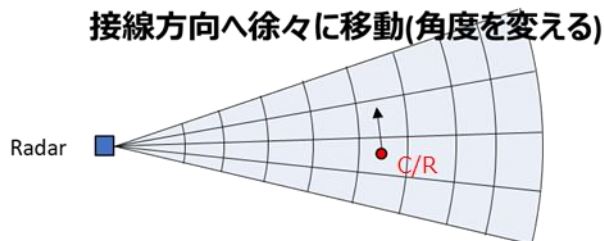
- ・ Radar の計測角とコーナリフレクタ(C/R)設置角の関係より導出される階段のステップ数が実機とシミュレーションで一致すること
- ・ ステップの大きさ d_1, d_2 の大きさに 15% 以上の開きがないこと



<垂直方位分解能>

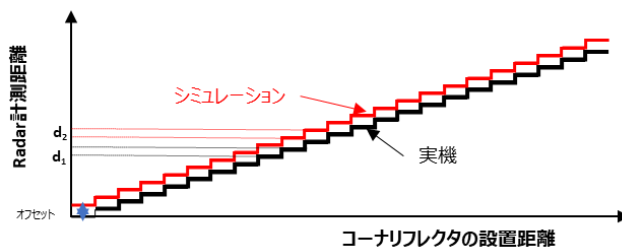
検証方法

Radar の FOV 内にコーナリフレクタ(C/R)設置、接線方向へ徐々に移動させレーダが計測する角度とコーナリフレクタ(C/R)設置各を比較することで垂直方位角度分解能を検証



判定基準

- ・ Radar の計測角とコーナリフレクタ(C/R)設置角の関係より導出される階段のステップ数が実機とシミュレーションで一致すること
- ・ ステップの大きさ d_1, d_2 の大きさに 15%以上の開きがないこと

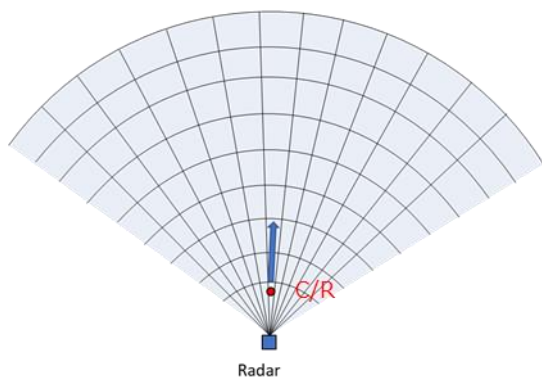


F.2.3.1.5 センサ自身の基本特性:分解能 相対速度

<速度分解能>

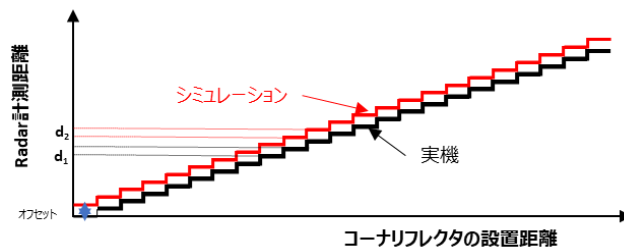
検証方法

Radar の FOV 内にコーナリフレクタ(C/R)を設置、リフレクターの速度を一定に保ち、速度を変化させた複数回の結果を用い評価



判定基準

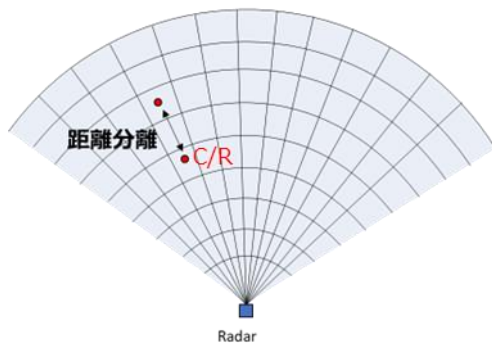
- ・ Radar の計測速度とコーナリフレクタ(C/R)の移動速度の関係より導出される階段のステップ数が実機とシミュレーションで一致すること
- ・ ステップの大きさ d_1, d_2 の大きさに 15%以上の開きがないこと



<距離分解能>

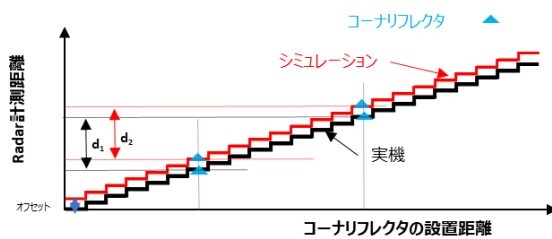
検証方法

Radar の FOV 内に、同一仕様のコーナリフレクタ(C/R)を 2 基近接して設置し、各物標の分離能力を検証し、2つのコーナリフレクタ(C/R)間の設置距離を段階的に変更しながら、複数回の測定を実施する。



判定基準

- ・ 複数回の測定より算出された平均分離距離の実機 d_1 とシミュレーション d_2 の大きさに 15%以上の開きが無いこと

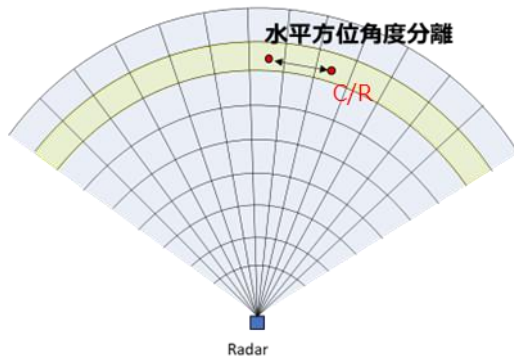


F.2.3.1.6 センサ自身の基本特性:分離能 距離・方位

<水平方位分離能>

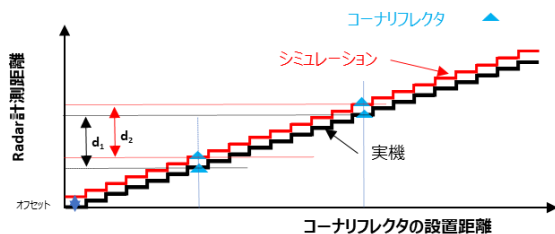
検証方法

Radar の FOV 内に、同一仕様のコーナリフレクタ(C/R)2 基を同一距離上に水平方向で近接配置し、各物標の分離能力を検証し、その後、2つのコーナリフレクタ(C/R)の設置角度を段階的に変更しながら、複数回の測定を実施する。



判定基準

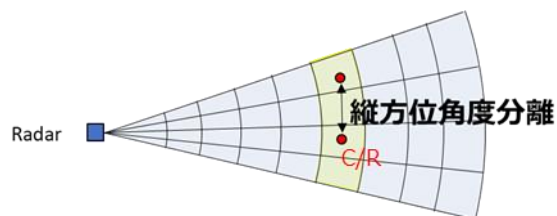
- ・ 複数回の測定より算出された平均分離角度の実機 d_1 とシミュレーション d_2 の大きさに 15% 以上の開きが無いこと



<垂直方位分離能>

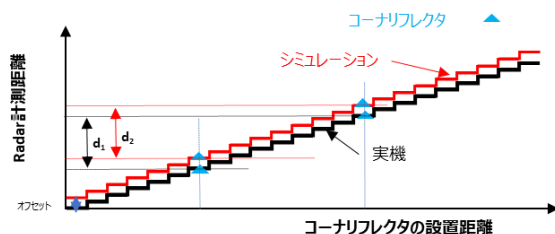
検証方法

Radar の FOV 内に、同一仕様のコーナリフレクタ(C/R)2 基を同一距離上に垂直方位で近接配置し、各物標の分離能力を検証し、その後、2 つのコーナリフレクタ(C/R)の設置角度を段階的に変更しながら、複数回の測定を実施する。



判定基準

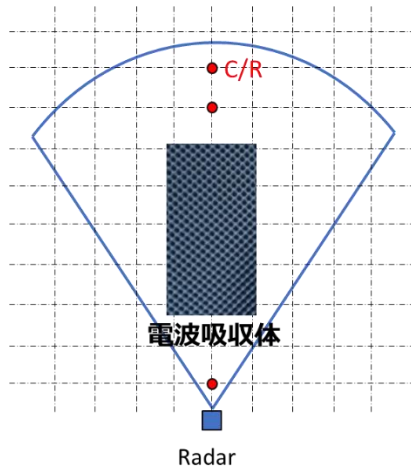
複数回の測定より算出された平均分離角度の実機 d_1 とシミュレーション d_2 の大きさに 15% 以上の開きが無いこと



F.2.3.1.7 センサ自身の基本特性: 自由空間 受信電力

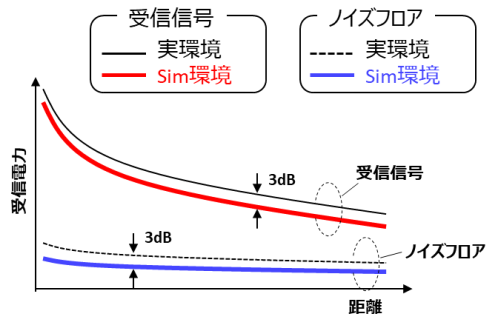
検証方法

Radar 正面にコーナリフレクタ(C/R)を設置し、コーナリフレクタ(C/R)の設置距離を変化させた場合の各距離における受信電力を計測(路面反射波の影響を除去するため、電波吸収体を路面反射点付近に設置)



判定基準

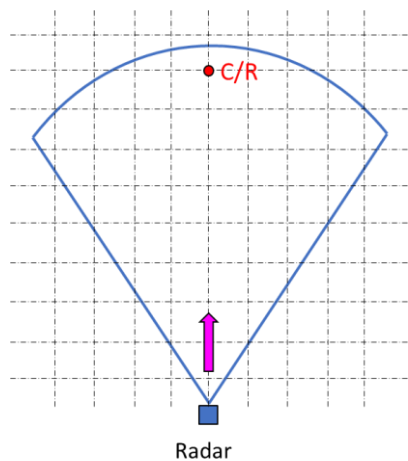
- ・ 受信電力の差異: 3dB 以下
- ・ ノイズフロア電力の差異: 3dB 以下
- ・ SNR の差異: 3dB 以下



F.2.3.1.8 センサ自身の基本特性:路面上 受信電力

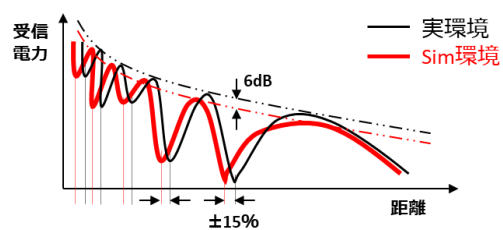
検証方法

Radar 正面にコーナリフレクタ(C/R)を設置し、コーナリフレクタ(C/R)に向かって Radar を移動



判定基準

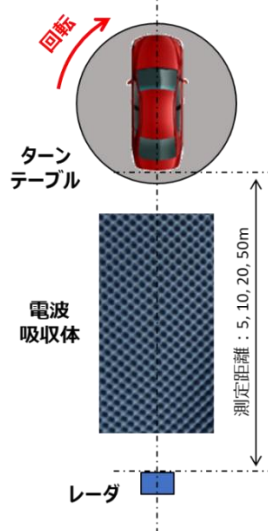
- ・ エンベロープの差異:6dB 以下
- ・ ノル点距離の差異:±15% 以下



F.2.3.1.9 認識対象物の反射特性 車両(乗用車・大型車) RCS

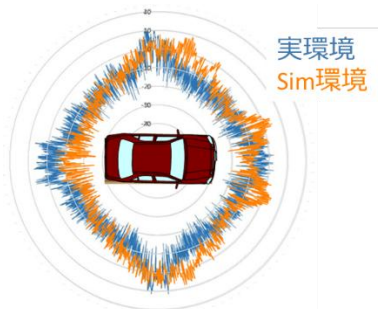
検証方法

- ・ レーダ電磁波を、ターンテーブル上の車両に照射する
- ・ 乗用車を回転させ、回転角度による受信電力の変化をプロットする
- ・ 測定距離: 5, 10, 20, 50 (m)
- ・ 車両の種類: 乗用車、大型トレーラ
- ・ 実環境とシミュレーション環境とで受信電力を比較する



判定基準

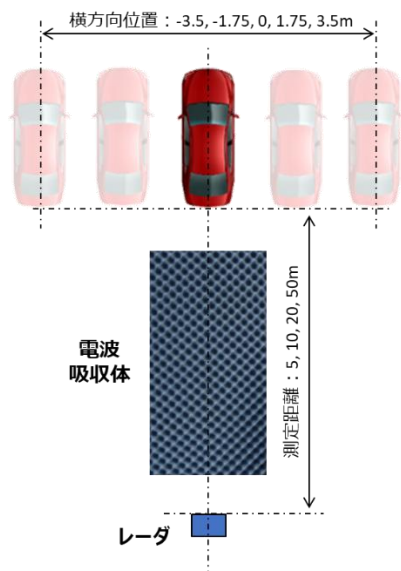
- ・ 受信電力の差異: 全方位で 3dB 以下



F.2.3.1.10 認識対象物の反射特性:車両(乗用車・大型車) 反射点

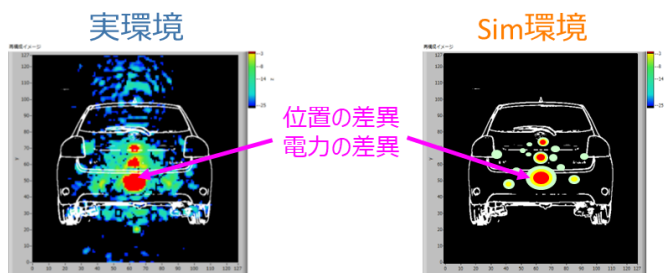
検証方法

- ・ 車両の後方からレーダ電磁波を照射し、レーダイメージを生成する
- ・ 測定距離: 5, 10, 20, 50 (m)
- ・ 車両の種類: 乗用車、大型トレーラ
- ・ 車両の横方向位置: 0, ± 1.75 , ± 3.5 (m) ※自車線上・区画線上・隣接車線上を想定
- ・ 実環境とシミュレーション環境とで、反射強度分布を比較する



判定基準

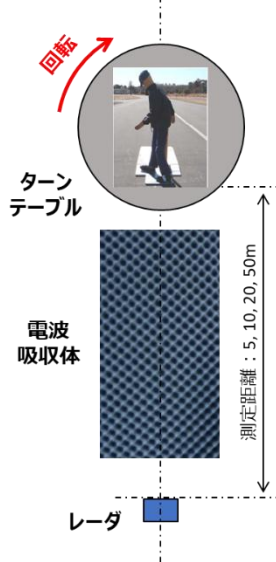
- ・ 反射強度ピーク位置の差異: 視野角 3° 以下
- ・ ピーク位置での受信電力の差異: 3dB 以下



F.2.3.1.11 認識対象物の反射特性: 歩行者 RCS

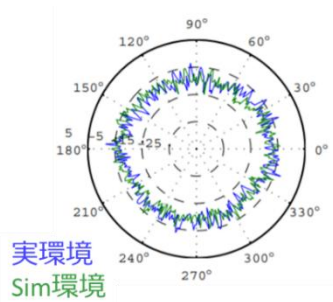
検証方法

- ・ レーダ電磁波を、ターンテーブル上の歩行者ダミーに照射する
- ・ ダミーを回転させ、回転角度による受信電力の変化をプロットする
- ・ 測定距離: 5, 10, 20, 50 (m)
- ・ 実環境とシミュレーション環境とで受信電力を比較する



判定基準

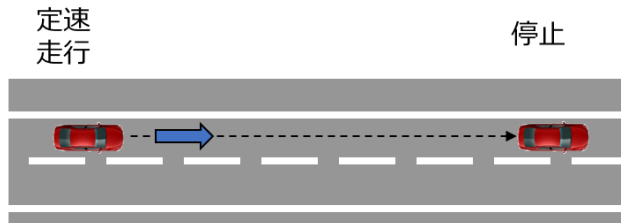
- ・ 受信電力の差異: 全方位で 3dB 以下



F.2.3.1.12 交通流の基本シナリオ: CCRs 受信電力

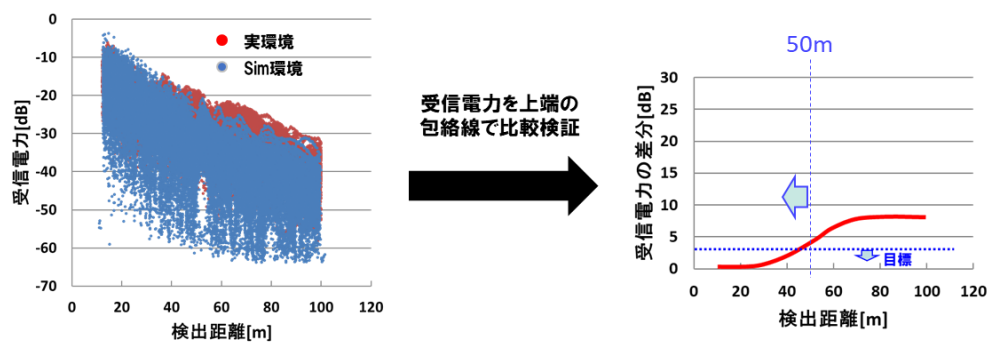
検証方法

- ・ NCAP の CCRs シナリオを再現する
- ・ 自車速: 20, 60 km/h の範囲で低速・高速の2点
- ・ 前方の停止ターゲット車両からの受信電力を測定し、曲線上端の包絡線をプロットする
- ・ 実環境とシミュレーション環境とで、包絡線変化を比較する



判定基準

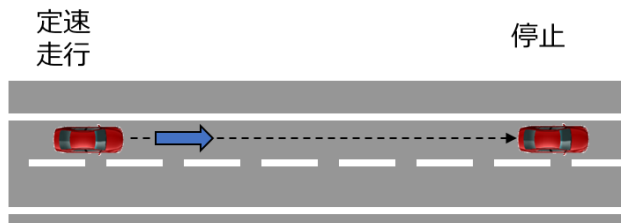
- ・ 相対距離 50m 以下での、受信電力包絡線の差異: 3dB 以下



F.2.3.1.13 交通流の基本シナリオ:CCRs 検出位置

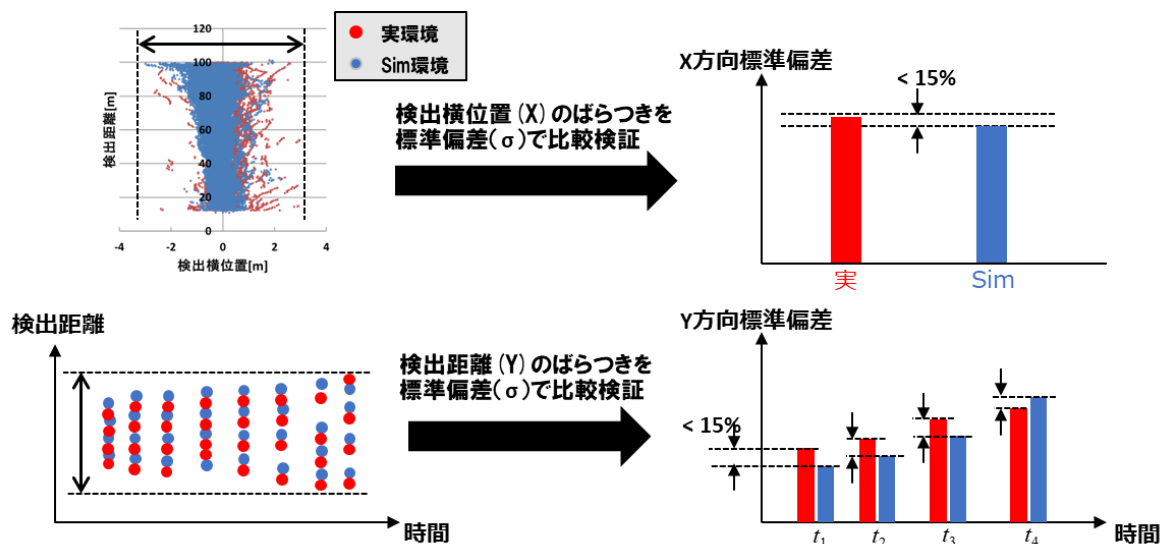
検証方法

- ・ NCAP の CCRs シナリオを再現する
- ・ 自車速: 20, 60 km/h の範囲で低速・高速の2点
- ・ 前方の停止ターゲット車両の反射点検出位置(X,Y)を測定する
- ・ 実環境とシミュレーション環境とで、検出位置ばらつき度合いを比較する



判定基準

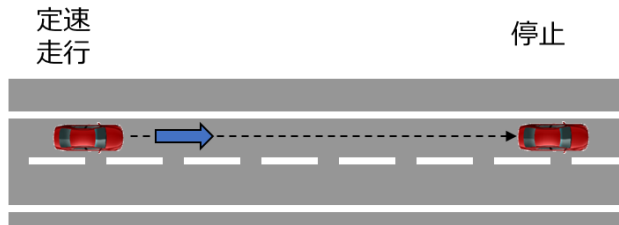
- ・ 相対距離 50m 以下での標準偏差の差異: X 方向(横方向) 15%以下
Y 方向(進行方向)15%以下



F.2.3.1.14 交通流の基本シナリオ:CCRs 検出速度

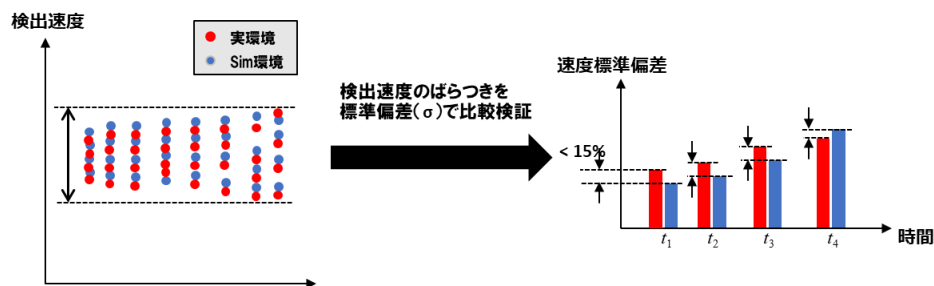
検証方法

- ・ NCAP の CCRs シナリオを再現する
- ・ 自車速: 20, 60 km/h の範囲で低速・高速の2点
- ・ 前方の停止ターゲット車両の反射点検出速度(Y 方向)を測定する
- ・ 実環境とシミュレーション環境とで、検出速度のばらつき度合を比較する



判定基準

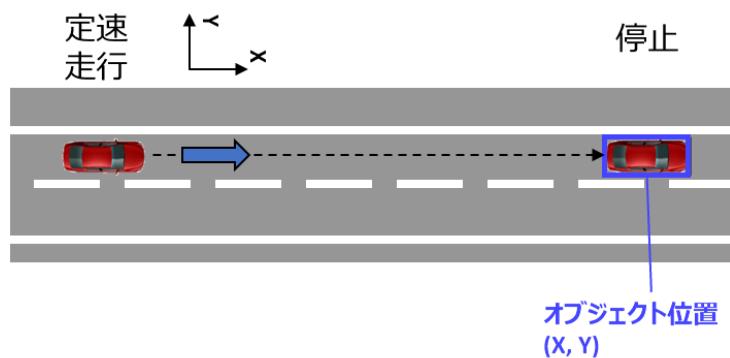
- ・ 相対距離 50m 以下での、標準偏差の差異: 15%以下



F.2.3.1.15 交通流の基本シナリオ:CCRs オブジェクト検出位置(距離・方位)

検証方法

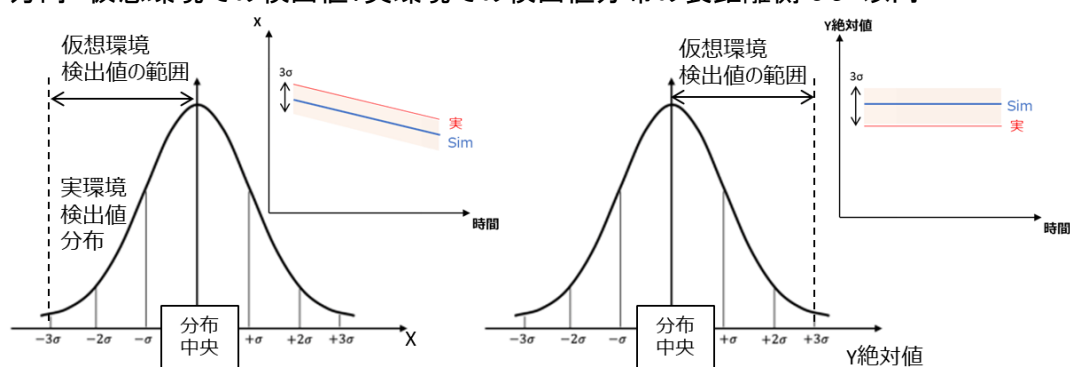
- ・ NCAP の CCRs シナリオを再現する。
- ・ 前方停止ターゲット車両の、オブジェクトとしての検出位置を測定する。
- ・ 自車速: 20, 60 km/h の範囲で低速・高速の2点
- ・ 実環境とシミュレーション環境とで、オブジェクト X-Y 座標を比較する



判定基準

相対距離 50m 以下において:

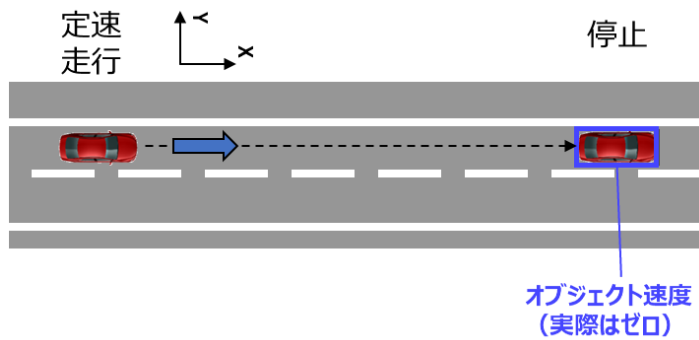
- ・ X 方向 仮想環境での検出値:実環境での検出値分布の短距離側 3σ 以内
- ・ Y 方向 仮想環境での検出値:実環境での検出値分布の長距離側 3σ 以内



F.2.3.1.16 交通流の基本シナリオ:CCRs オブジェクト検出速度

検証方法

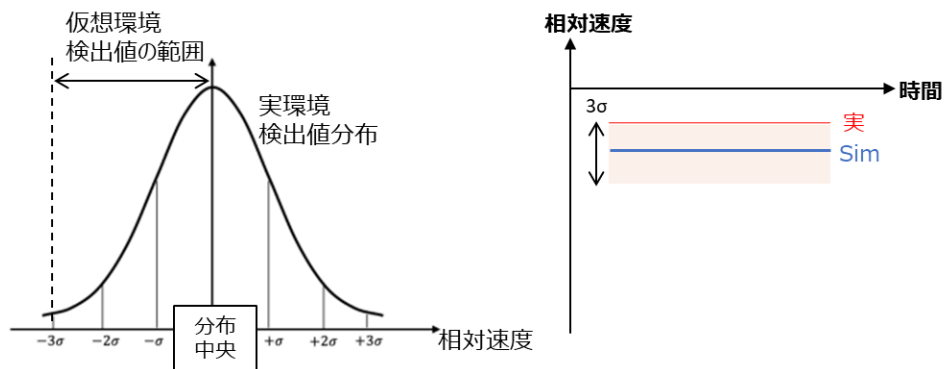
- ・ NCAP の CCRs シナリオを再現する
- ・ 前方停止ターゲット車両の、オブジェクトとしての検出速度を測定する
- ・ 自車速: 20, 60 km/h で低速・高速の2点
- ・ 実環境とシミュレーション環境とで、オブジェクト速度を比較する



判定基準

相対距離 50m 以下において:

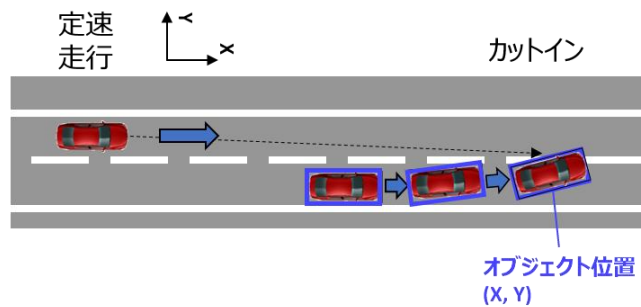
- ・ 仮想環境での検出値:実環境での検出値分布の速度が小さい側 3σ 以内



F.2.3.1.17 交通流の基本シナリオ:カットイン オブジェクト検出位置(距離・方位)

検証方法

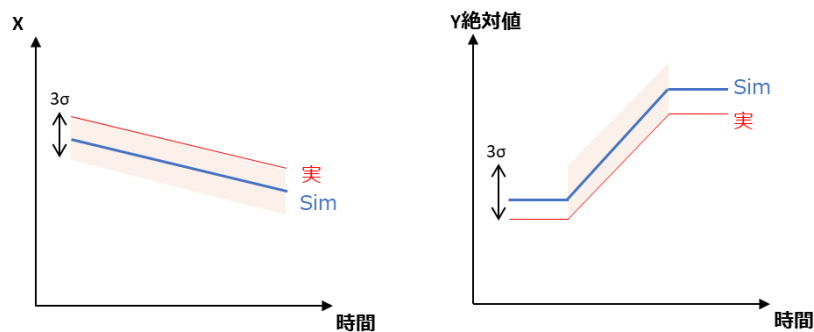
- ・ 他車両が自車前方にカットインするシナリオにて、車両オブジェクト検出位置をプロットする
- ・ 自車速: 定速(60km/h)
- ・ オブジェクト車速: 縦方向 定速(40km/h 程度)
横方向 0.2~2.0 m/s の範囲で3点
- ・ オブジェクト種類: 乗用車、大型トレーラ
- ・ 実環境とシミュレーション環境とで、検出位置を比較する



判定基準

相対距離 50m 以下において:

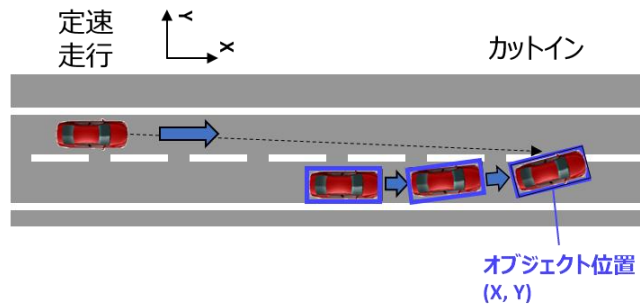
- ・ X 方向 仮想環境での検出値:実環境での検出値分布の短距離側 3σ 以内
- ・ Y 方向 仮想環境での検出値:実環境での検出値分布の長距離側 3σ 以内



F.2.3.1.18 交通流の基本シナリオ:カットイン オブジェクト検出速度

検証方法

- ・ 他車両が自車前方にカットインするシナリオにて、車両オブジェクトの検出速度をプロットする
- ・ 自車速: 定速(60km/h 程度)
- ・ オブジェクト車速:縦方向 定速(40km/h 程度)
- ・ 横方向 0.2~2.0 m/s の範囲で3点
- ・ オブジェクト種類:乗用車、大型トレーラ
- ・ 実環境とシミュレーション環境とで、検出速度値を比較する



判定基準

相対距離 50m 以下において:

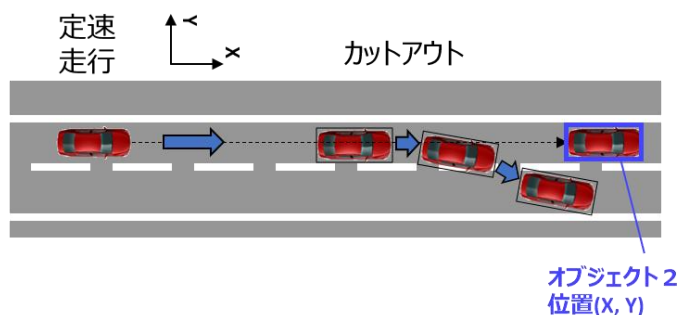
- ・ 仮想環境での検出値:実環境での検出値分布の速度が小さい側 3σ 以内



F.2.3.1.19 交通流の基本シナリオ:カットアウト オブジェクト検出位置(距離・方位)

検証方法

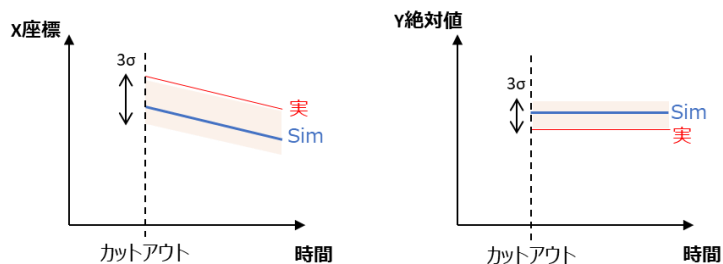
- ・ 先行車両がカットアウトした前方に停止車両がいるシナリオにて、停止車両(オブジェクト2)の検出位置をプロットする
- ・ 自車速: 定速(60km/h 程度)
- ・ オブジェクト1の車速: 縦方向 定速(40km/h 程度)
横方向 1.0 m/s 程度
- ・ オブジェクト1の種類: 乗用車(カットアウト車両)
- ・ オブジェクト2の種類: 乗用車(停止状態)
- ・ 実環境とシミュレーション環境とで、オブジェクト2の検出位置を比較



判定基準

カットアウト後の検出位置:

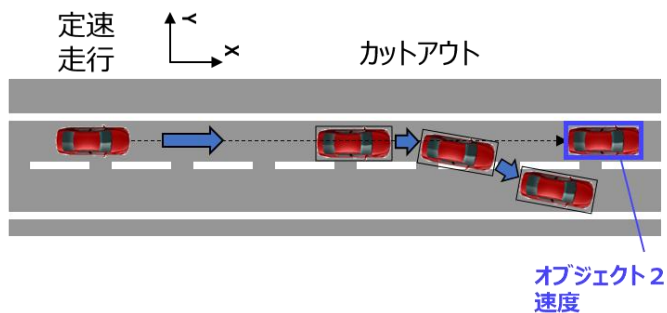
- ・ X 方向 仮想環境での検出値: 実環境での検出値分布の短距離側 3σ 以内
- ・ Y 方向 仮想環境での検出値: 実環境での検出値分布の長距離側 3σ 以内



F.2.3.1.20 交通流の基本シナリオ:カットアウト オブジェクト検出速度

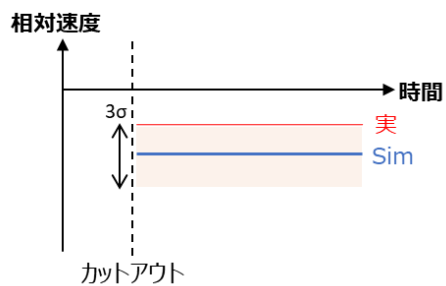
検証方法

- ・ 先行車両がカットアウトした前方に停止車両がいるシナリオにて、停止車両(オブジェクト2)の検出速度をプロットする
- ・ 自車速: 定速(60km/h 程度)
- ・ オブジェクト1の車速:縦方向 定速(40km/h 程度)
横方向 1.0 m/s 程度
- ・ オブジェクト1の種類:乗用車(カットアウト車両)
- ・ オブジェクト2の種類:乗用車(停止状態)
- ・ 実環境とシミュレーション環境とで、オブジェクト2の検出速度を比較



判定基準

- ・ 仮想環境での検出値:実環境での検出値分布の速度が小さい側 3σ 以内

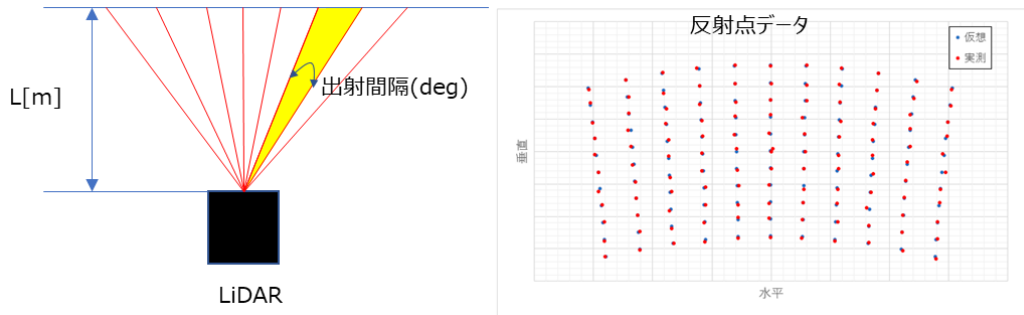


F.2.3.2 LiDAR の共通要件の妥当性確認手法

F.2.3.2.1 センサ自身の基本特性: 方位

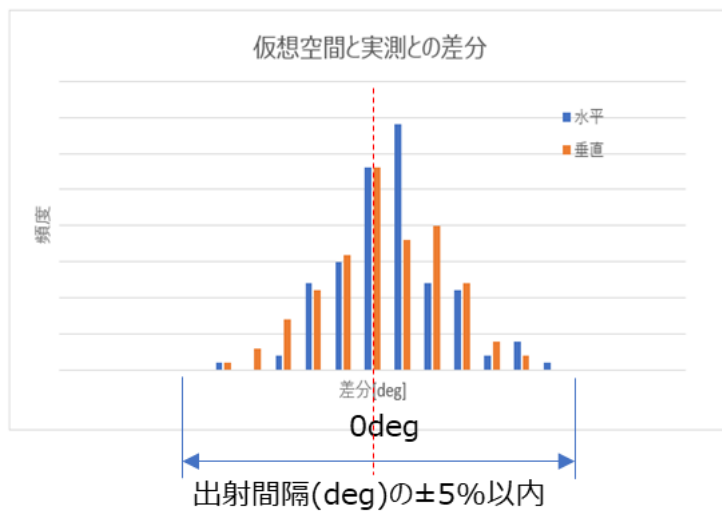
検証方法

- ・ LiDAR から既知の距離 L 離れた壁に送信光を照射し、光線の座標位置を測定
- ・ 仮想と実測との差分が許容範囲内であることを確認



判定基準

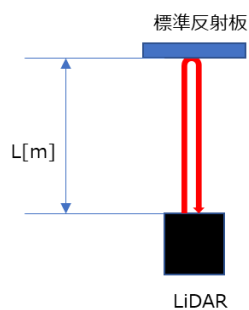
- ・ 出射間隔(deg)の $\pm 5\%$ 以内(仮)



F.2.3.2.2 センサ自身の基本特性: 距離

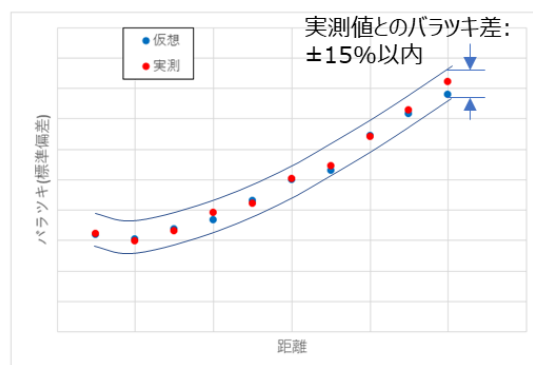
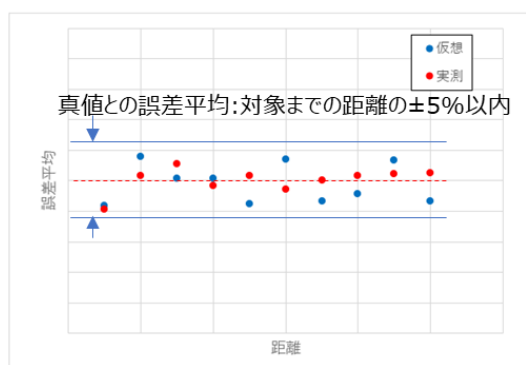
検証方法

- ・ LiDAR と標準反射板の距離を変えて、距離の誤差とバラツキを測定



判定基準

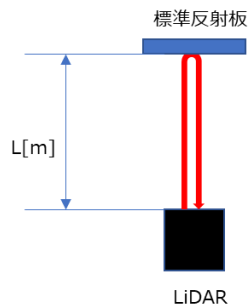
- ・ 真値との誤差平均:対象までの距離の $\pm 5\%$ 以内
- ・ 実測値とのバラツキ差: $\pm 15\%$ 以内



F.2.3.2.3 センサ自身の基本特性:強度・検出確率

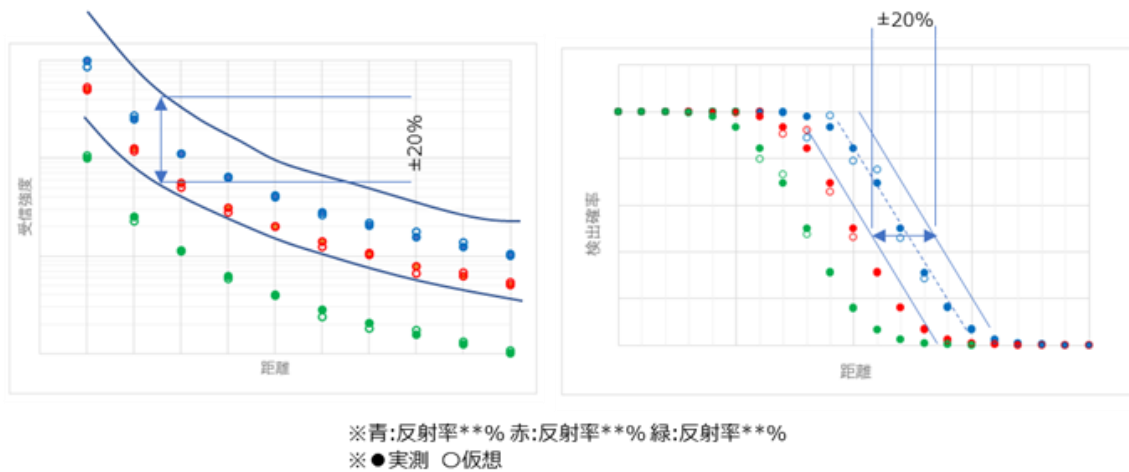
検証方法

- ・ LiDAR と標準反射板の距離を変えて、受信強度と検出確率を測定



判定基準

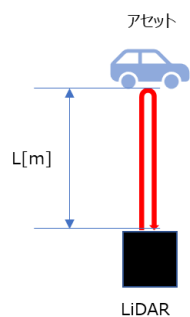
- ・ 実測値との強度誤差: $\pm 20\%$ 以内
- ・ 実測との検出確率差@検出確率 90%: $\pm 20\%$ 以内
- ・ 実測との検出確率差@検出確率 50%: $\pm 20\%$ 以内
- ・ 実測との検出確率差@検出確率 10%: $\pm 20\%$ 以内



F.2.3.2.4 認識対象物の反射特性: 点数

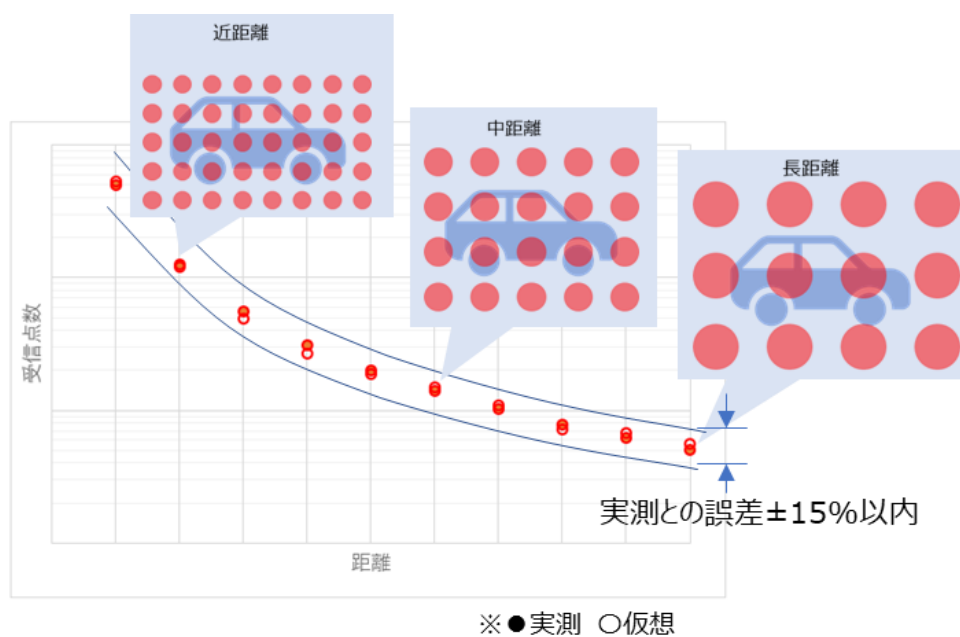
検証方法

- ・ LiDAR とアセットの距離を変えて測定



判定基準

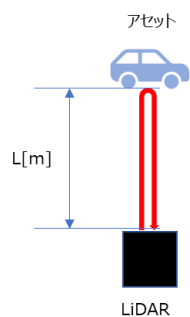
- ・ 実測点数との誤差±15%以内（受信点数が少なくなる遠方は除外）



F.2.3.2.5 認識対象物の反射特性: 大きさ

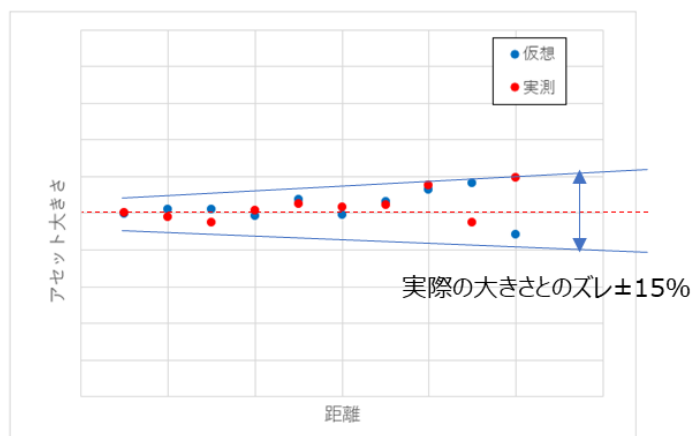
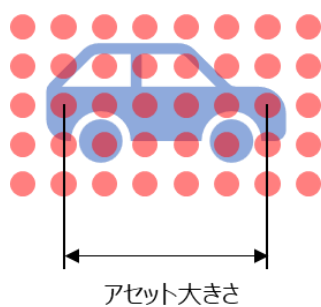
検証方法

- ・ LiDAR とアセット距離を変え大きさを測定



判定基準

- ・ 実際の大きさとのズレが 15%以内



F.2.3.2.6 認識対象物の反射特性:動的検証 点群データ

検証方法

- ・ 静止した車両に近づき、時間的な方位、距離、検出点数、大きさの変化を、実測とシミュレーションで比較（例:40km/h で認識対象に接近、20m手前の位置でブレーキをかけ停止）



判定基準

各時刻での距離、検出点数、大きさ、が前出の基準(F.2.3.3.2, F.2.3.2.4, F.2.3.2.5)を満たしていること

■認識対象物の反射特性:動的検証 オブジェクト

検証方法

静止した車両に近づき、オブジェクトとしての時間的な距離、大きさの変化を、実測とシミュレーションで比較。（例:40km/h で認識対象に接近、20m手前の位置でブレーキをかけ停止）



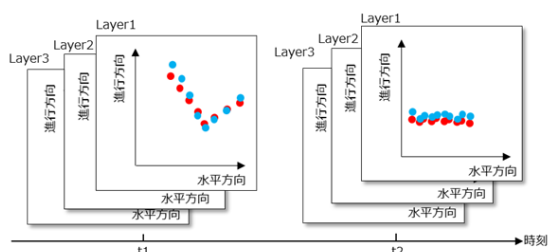
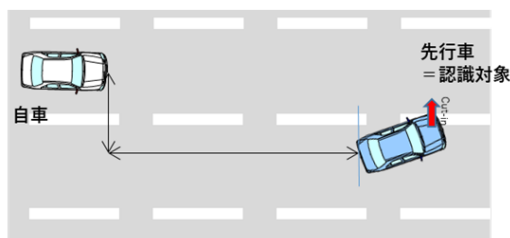
判定基準

各時刻での距離(進行方向、水平方向)、大きさ、が前出の基準(F.2.3.2.2, F.2.3.2.5)を満たしていること

F.2.3.2.7 交通流の基本シナリオ:Cut-in シナリオ(普通車) 点群データ

検証方法

- 普通車の Cut-in において、時間的な方位、距離、検出点数、大きさの変化を、実測とシミュレーションで比較。(例:自車速 60km/h、先行車進行方向 40km/h、横速度 1.0m/s で Cut-in)



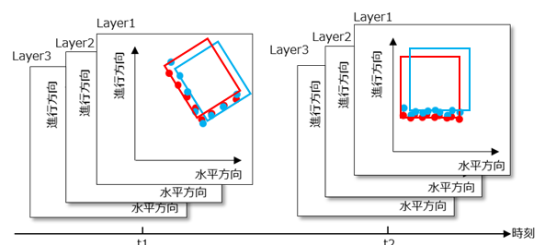
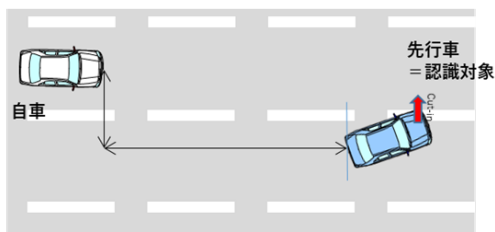
判定基準

各時刻での距離(進行方向、水平方向)、検出点数、大きさが前出の基準(F.2.3.3.2, F.2.3.2.4, F.2.3.2.5)を満たしていること

F.2.3.2.8 交通流の基本シナリオ:Cut-in シナリオ(普通車) オブジェクト

検証方法

普通車の Cut-in において、オブジェクトとしての時間的な距離、大きさの変化を、実測とシミュレーションで比較。(例:自車速 60km/h、先行車進行方向 40km/h、横速度 1.0m/s で Cut-in)



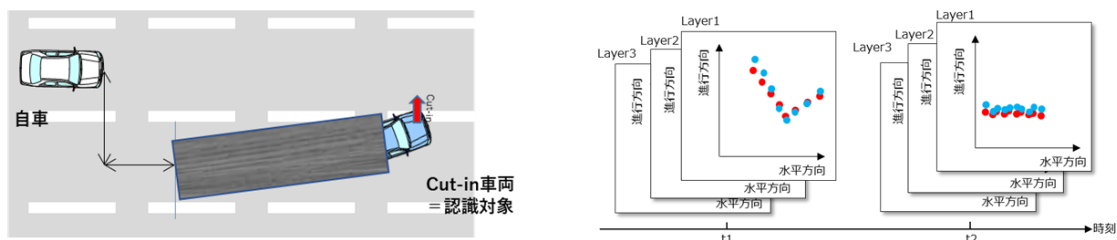
判定基準

各時刻での距離(進行方向、水平方向)、大きさ、が前出の基準(F.2.3.2.2, F.2.3.2.5)を満たしていること

F.2.3.2.9 交通流の基本シナリオ: Cut-in シナリオ(大型車) 点群データ

検証方法

大型車の Cut-in において、時間的な方位、距離、検出点数、大きさの変化を、実測とシミュレーションで比較。(例: 自車速 60km/h、先行車進行方向 40km/h、横速度 1.0m/s で Cut-in)



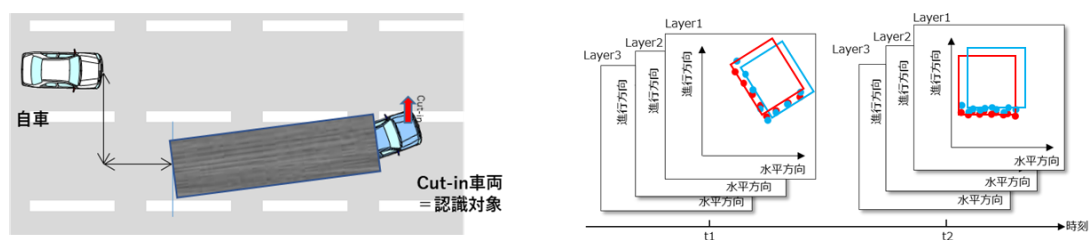
判定基準

各時刻での距離、検出点数、大きさが前出の基準(F.2.3.3.2, F.2.3.2.4, F.2.3.2.5)を満たしていること

F.2.3.2.10 交通流の基本シナリオ: Cut-in シナリオ(大型車) オブジェクト

検証方法

大型車の Cut-in において、オブジェクトとしての時間的な距離、大きさの変化を、実測とシミュレーションで比較。(例: 自車速 60km/h、先行車進行方向 40km/h、横速度 1.0m/s で Cut-in)



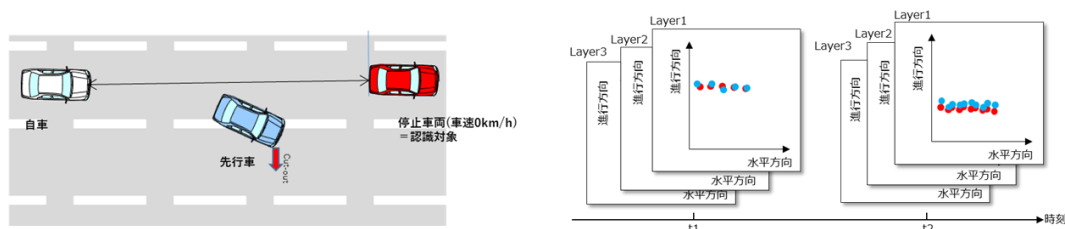
判定基準

各時刻での距離(進行方向、水平方向)、大きさが前出の基準(F.2.3.2.2, F.2.3.2.5)を満たしていること

F.2.3.2.11 交通流の基本シナリオ: Cut-out シナリオ 点群データ

検証方法

先行車が Cut-out した後、静止した車両に近づき、時間的な方位、距離、検出点数、大きさの変化を、実測とシミュレーションで比較。(例: 自車速 40km/h で追従中に先行車 Cut-out、認識対象に接近)



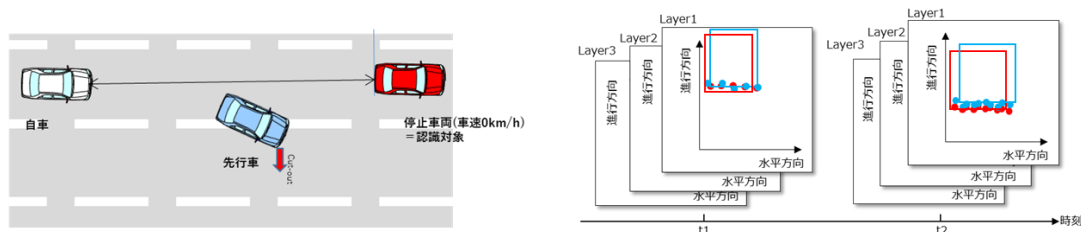
判定基準

各時刻での距離、検出点数、大きさが前出の基準((F.2.3.3.2, F.2.3.2.4, F.2.3.2.5)を満たしていること

F.2.3.2.12 交通流の基本シナリオ: Cut-out シナリオ オブジェクト

検証方法

先行車が Cut-out した後、静止した車両に近づき、オブジェクトとしての時間的な距離、大きさの変化を、実測とシミュレーションで比較。(例: 自車速 40km/h で追従中に先行車 Cut-out、認識対象に接近)



判定基準

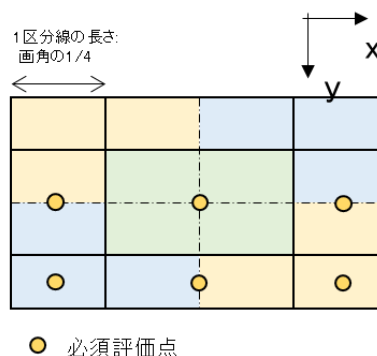
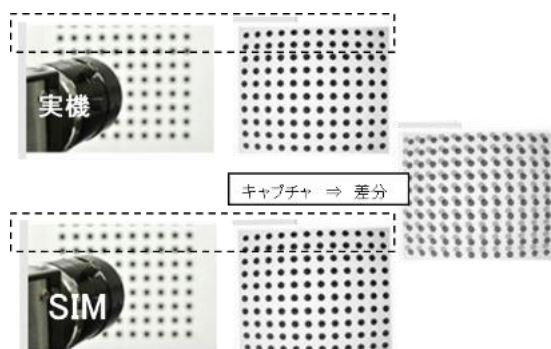
各時刻での距離(進行方向、水平方向)、大きさが前出の基準(F.2.3.2.2, F.2.3.2.5)を満たしていること

F.2.3.3 カメラの共通要件の妥当性確認手法

F.2.3.3.1 単体カメラ モジュールの調整 画角/光軸/歪み

検証方法

- ・ テストチャート(グリッド線またはグリッド点)を用い、歪みおよび解像度について、RAW データを基に実機カメラ映像とシミュレーション生成映像とのズレが最小となるよう調整する。
実機カメラにおいて、グリッドチャートの水平を保ちつつ、チャートの中心点を撮像デバイスの中心点に合わせて、映像を取得する
- ・ シミュレーションで再現したカメラにおいても同様に中心点をそろえて、周辺のグリッドが実機映像と(位置的に)同等になるようにカメラ関係のパラメータを調整する
- ・ 調整パラメータ(以下に実施の例を示す)
 - 画面全体の歪特性、解像度特性、等
 - レンズの焦点距離、歪特性、各種収差、組立て(レンズと撮像デバイス間)の中心偏差、角度偏差、等



[計測条件]

- ・ 暗室
- ・ 既知テストチャートを用いる
- ・ 既知光源を用いる
- ・ 検証時の光源(ヘッドライト、太陽光)

判定基準

- ・ 目視において、画像全体でほぼ重なっている(視覚解像度、SFR 空間周波数応答、限界解像度、との観点からグリッドの広がり具合を評価)
評価点付近のグリッド座標で実機との差が ± 2 [ピクセル]の範囲

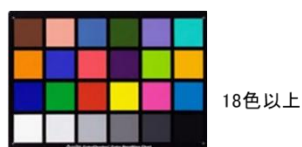
F.2.3.3.2 単体カメラ モジュールの調整 色彩輝度

検証方法

テストチャート(色彩)を用い、輝度および色味の表現について、RAW データを基に実機カメラ映像とシミュレーション生成映像とのズレが最小となるよう調整する

- ・ チャート内の各色のブロックで計測する
- ・ 対象画像位置において、16[ピクセル]以上の統計量(輝度、彩度の平均値、標準偏差)を計測する
- ・ カメラ一般の性能の輝度表現および色の再現性で実機カメラとシミュレーション上再現されたカメラで同等になるようにカメラ関係のパラメータを調整する
- ・ 調整パラメータ(以下に実施の例を示す)
 - 撮像デバイスの光電変換特性、等
 - レンズ、撮像デバイスのフィルタの透過率、等
- ・ 確認パラメータ(実機カメラとシミュレーション映像で一致している前提)
 - 撮像デバイスの露光制御特性、等
 - HDR(ハイダイナミックレンジ)特性、等
 - ISP(画像信号処理)の各種設定値、等

マクベスチャート



輝度表現範囲
+色味

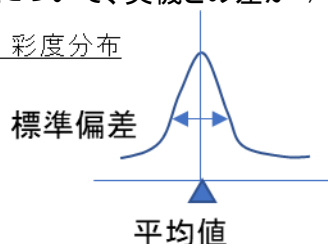
[計測条件]

- ・ 暗室
- ・ 既知テストチャートを用いる
- ・ 既知光源を用いる
- ・ 検証時の光源(ヘッドライト、太陽光)

判定基準

- ・ 各項目について、実機との差が $\pm 5\%$ の範囲

輝度、彩度分布



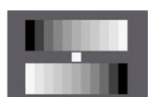
F.2.3.3.3 単体カメラ モジュールの調整 ダイナミックレンジ

検証方法

既知照明の光度(輝度)を段階的に変化させて、光度に対するカメラのダイナミックレンジを計測し、RAW データを基に実機カメラとシミュレーションの映像のズレを最小に調整する

- ・ 白飛びするまでの光度 vs 画素値(明度値)
- ・ 白飛びした時の光度を 1 とし、黒つぶれする時の光度までを、6 段階以上で比較する
- ・ 計測点の水準は等比(1/2, 1/4, 1/8, など)が望ましい
- ・ ダイナミックレンジ特性が同等になるようにカメラ関係のパラメータを調整する
- ・ 調整パラメータ(以下に実施の例を示す)
 - 撮像デバイスの露光制御特性、等
 - HDR(ハイダイナミックレンジ)特性、等
- ・ 確認パラメータ(実機カメラとシミュレーションで一致している前提)
 - ISP(画像信号処理)の各種設定値、等

グレイチャート



13ステップ以上



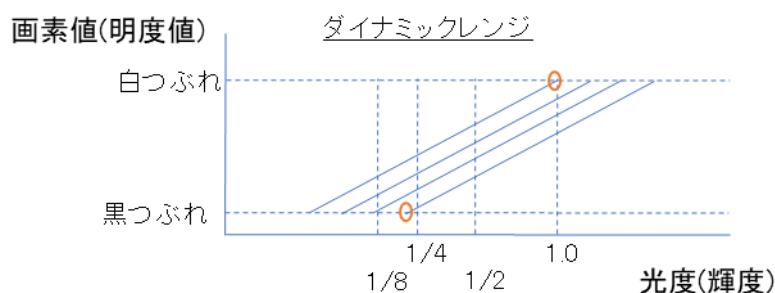
ダイナミックレンジ検証

[計測条件]

- ・ 暗室
- ・ 既知テストチャートを用いる
- ・ 既知光源を用いる
- ・ 検証時の光源(ヘッドライト、太陽光)

判定基準

- ・ 白つぶれ時の光度は、実機との差が $\pm 5\%$ の範囲
- ・ 黒つぶれ時の光度は、実機との差が $\pm 5\%$ の範囲

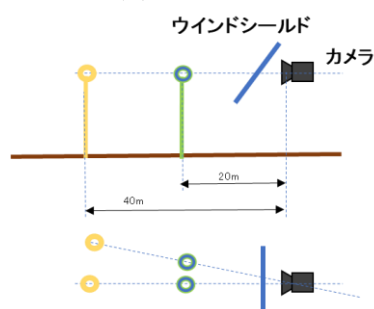


F.2.3.3.4 車載カメラ カメラ前面の調整 光軸

検証方法

実機カメラの光軸が路面と水平で車両進行軸と並行に取り付ける前提において、エーミング手法を用いて取付け誤差の影響を最小に調整する

- ・ 光軸上の距離の異なる目標点が撮像デバイスの中心点に、さらに距離の異なる目標点を右側にずらしたものが撮像デバイスの中心点と同じライン上になるようにカメラの取付け仕様に従い取り付け、調整する
- ・ シミュレーション上に再現されたカメラにおいても(位置的に)同等になるように関係するパラメータを調整する
- ・ 調整パラメータ(以下に実施の例を示す)
 - 1)カメラの取付けの高さと向き(車でのヨー、ピッチ、ロール)
 - 2)ウインドシールドの厚み、曲率、傾斜角、屈折率

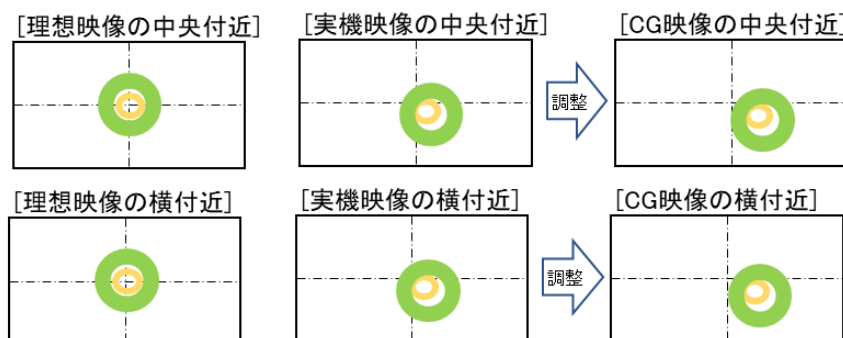


[計測条件]

- ・車載
- ・既知目標点を用いる
- ・既知光源を用いる
- ・天空光(太陽光)
- ・既知の路面(アスファルト、水平)

判定基準

- ・ 目標点の画像上での位置において、実機との差が ± 5 [ピクセル]の範囲

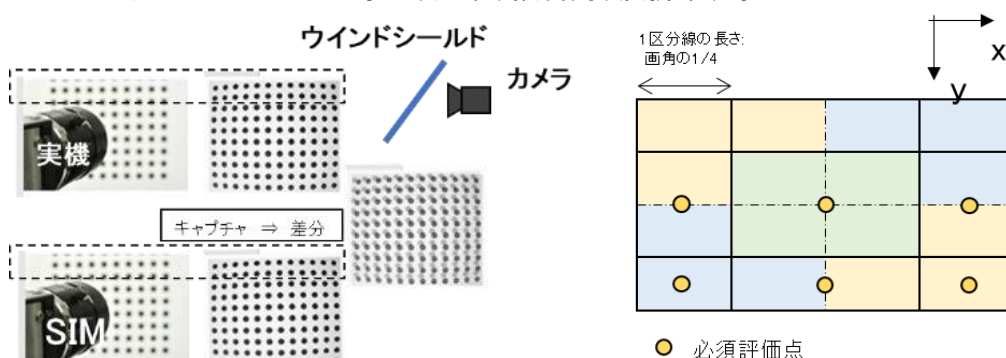


F.2.3.3.5 車載カメラ カメラ前面の調整 歪み

検証方法

テストチャート(グリッド線またはグリッド点)を用い、歪みおよび解像度について、RAW データを基にウインドシールドを介した実機カメラ映像とシミュレーション映像とのズレが最小となるよう調整する

- ・ 実機カメラにおいて、テストチャートの水平を保ちつつ、チャートの中心点を撮像デバイスの中心点に合わせて、映像を取得する
- ・ シミュレーション上に再現されたカメラにおいても同様に中心点をそろえて、周辺のグリッドが実機映像と(位置的に)同等になるようにカメラ関係のパラメータを調整する
- ・ 調整パラメータ(以下に実施の例を示す)
 - 画面全体の歪特性、解像度特性、等
 - カメラの取付けの高さと向き(車でのヨー、ピッチ、ロール)
 - ウインドシールドの厚み、曲率、傾斜角、屈折率、等



[計測条件]

- ・ 暗室
- ・ 既知テストチャートを用いる
- ・ 既知光源を用いる
- ・ 検証時の光源(ヘッドライト、太陽光)

判定基準

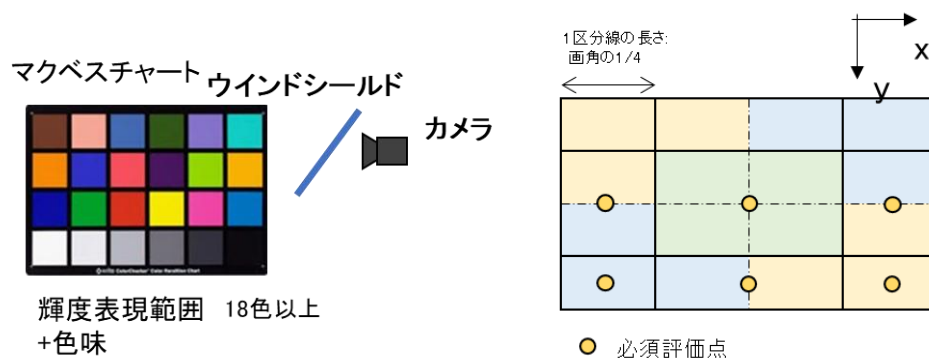
- ・ 目視において、画像全体でほぼ重なっている(視覚解像度、SFR 空間周波数応答、限界解像度、との観点からグリッドの広がり具合を評価)
- ・ 評価点付近のグリッド座標で実機との差が
 - 中央付近: ± 5 [ピクセル] の範囲
 - 周辺付近: ± 30 [ピクセル] の範囲

F.2.3.3.6 車載カメラ カメラ前面の調整 色彩輝度

検証方法

テストチャート(色彩)を用い、輝度および色味の表現について、RAW データを基にウインドシールドを介した実機カメラ映像とシミュレーション映像とのズレが最小となるよう調整する

- ・ チャート内の各色ブロックで計測する
- ・ 対象画像位置において、16[ピクセル]以上の統計量(輝度、彩度の平均値、標準偏差)を計測する
- ・ カメラ一般の性能の輝度表現および色の再現性で評価する
- ・ 調整パラメータ(以下に実施の例を示す)
- ・ ウインドシールドの波長の反射率、透過率、等

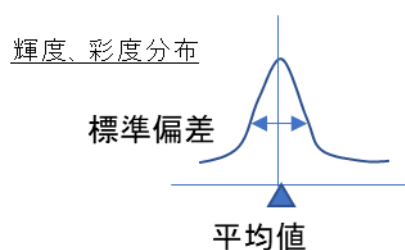


[計測条件]

- ・ 暗室
- ・ 既知テストチャートを用いる
- ・ 既知光源を用いる
- ・ 検証時の光源(ヘッドライト、太陽光)

判定基準

- ・ 各評価点で各項目について、実機との差が $\pm 5\%$ の範囲

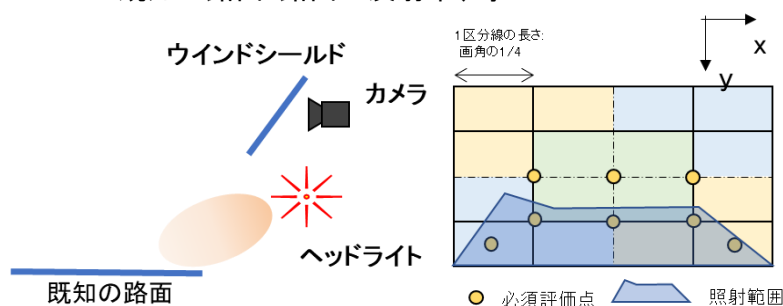


F.2.3.3.7 車載カメラ カメラ前面の調整 色彩輝度(ヘッドライト)

検証方法

ヘッドライトの配光パターンに対して、2ステップ(既知の反射板、既知の路面)で観測ポイント(照射範囲内:5点以上、照射範囲外:3点以上)における色彩輝度が実機とシミュレーション映像とのズレを最小に調整する。

- ・ 対象画像位置において、16[ピクセル]以上の統計量(輝度、彩度の平均値、標準偏差)を計測する
- ・ 調整パラメータ(以下に実施の例を示す)
 - 既知の反射板:ヘッドライトの各方向の光線の色彩と輝度、等
 - 既知の路面:路面の反射率、等

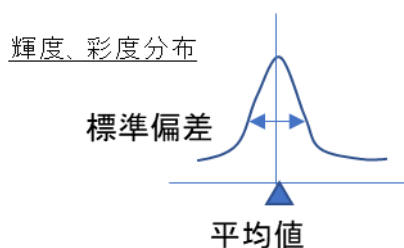


[計測条件]

- ・ 暗室
- ・ 既知の光源(ヘッドライト)
- ・ 既知の反射板(ランバート反射板、垂直)
- ・ 既知の路面(アスファルト、水平)

判定基準

- ・ 各評価点で各項目について、実機との差が $\pm 5\%$ の範囲

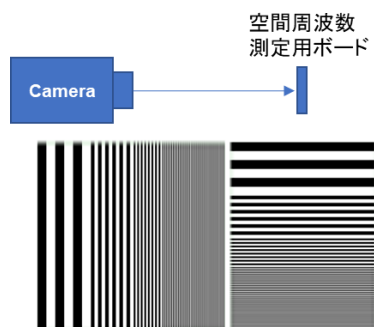


F.2.3.3.8 車載カメラ 空間周波数の再現

検証方法

空間周波数測定用ボードを用い、RAW データを基に実機カメラ映像とシミュレーション映像の空間周波数特性が判断基準を満たすように調整する。

- ・ 実機カメラにおいて、空間周波数測定用ボードの水平を保ちつつ、チャートの中心点を撮像デバイスの中心点に合わせて、映像を取得、水平/垂直方向の MTF 曲線を求める
- ・ シミュレーション上に再現されたカメラにおいても同様に中心点をそろえて、黒線の位置が実機映像と(位置的に)同等になるように車両姿勢や搭載位置のパラメータを調整し、映像を取得、水平/垂直向の MTF 曲線を求める

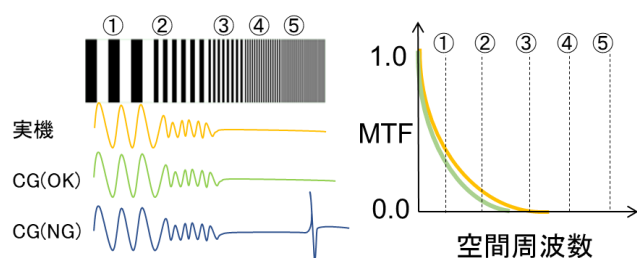


[計測条件]

- ・ 暗室
- ・ 既知光源を用いる(ボード全体が適度なコントラストを維持できていること)
- ・ カメラスペックに応じて適切な解像度を測定可能な空間周波数測定用ボードを用意すること
- ・ ピントが合う距離にボードを設置すること

判定基準

- ・ MTF が 0 以外の領域で MTF の差異が $\pm 5\%$ 以下に収まっている事
- ・ MTF が 0 に近い領域においてシミュレーションの結果で実機以上となるコントラストが発生しない事

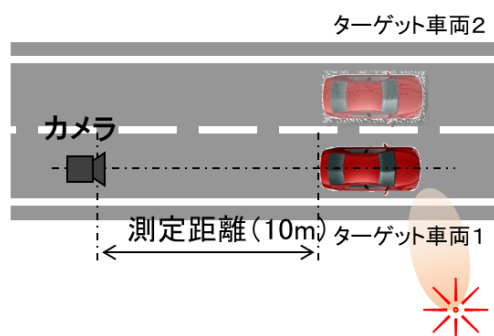


F.2.3.3.9 アセット・シナリオ 認識対象(車両) 配置

検証方法

認識対象の配置が実機とシミュレーション映像で同等であることを確認する。

- ・ 自車速: 停車 もしくは 5[km/h]程度もしくは 10[km/h]程度
- ・ ターゲット車車速: 停車 もしくは 5[km/h]程度もしくは 10[km/h]程度
- ・ 既知道路(直線、定常円(例: R100 程度))を走行する
- ・ ターゲット車両 1 は乗用車とする
- ・ ターゲット車両 2 は大型車とする
- ・ ターゲット車両 1 との初期車間距離 10[m]付近もしくは 30[m]付近
- ・ ターゲット車両 2 との初期車間距離 10[m]付近
- ・ ターゲット車両 1 は停車または車間距離を維持する
- ・ ターゲット車両 2 は車間距離を維持する
- ・ ターゲット車両 1 は自車線を維持する
- ・ ターゲット車両 2 は初期車線を自車線または隣車線とし、車線を維持もしくは車線変更する
- ・ 自車線前方のターゲット車両 1,2 との距離(位置)、相対速度の時系列データおよび実機映像を取得する
- ・ 同シナリオにおいてシミュレーションで映像を作成する
- ・ 車両上の3点以上の特異点(ボディの隙間、など)の双方の画像上の位置を測定し、比較する



[計測条件]

- ・ 車載
- ・ 既知目標点を用いる
- ・ 既知光源天空光(太陽光、新月)
- ・ 既知の路面(アスファルト、水平)

※参照情報: 中央付近の判定基準において

- ・ 車間距離の計測誤差を1%とする
- ・ ある画像センサでは 水平画素数: 2880 [pixel]
横幅: 8.64×10^{-3} [m]
- ・ レンズ特性として 焦点距離: 7.9×10^{-3} [m]
歪み率: 15%
- ・ 車両諸元より 車両幅: 1.745 [m]

判定基準

特異点の相関距離について、実機との差が画像上の位置により

- ・ 中央付近: ± 5 [ピクセル]の範囲
- ・ 周辺付近: ± 30 [ピクセル]の範囲

F.2.3.3.10 アセット・シナリオ 認識対象(車両) 色彩輝度

検証方法

認識対象の色彩輝度が実機とシミュレーション映像で同等であることを確認する。

- ・ 自車速: 停車 もしくは 5[km/h]程度もしくは 10[km/h]程度
- ・ ターゲット車車速: 停車 もしくは 5[km/h]程度もしくは 10[km/h]程度
- ・ 既知道路(直線、定常円(例: R100 程度))を走行する
- ・ ターゲット車両 1 は乗用車、ターゲット車両 2 は大型車とする
- ・ ターゲット車両 1 との初期車間距離 10[m]付近もしくは 30[m]付近
- ・ ターゲット車両 2 との初期車間距離 10[m]付近
- ・ ターゲット車両 1 は停車または車間距離を維持する
- ・ ターゲット車両 2 は車間距離を維持する
- ・ ターゲット車両 1 は自車線を維持する
- ・ ターゲット車両 2 は初期車線を自車線または隣車線とし、車線を維持もしくは車線変更する
- ・ 自車線前方のターゲット車両 1, 2 との距離(位置)、相対速度の時系列データおよび実機映像を取得する
- ・ 同シナリオにおいてシミュレーションで映像を作成する
- ・ ボディ、バンパ、出来れば、テールランプに対して、日が当たっている時と影の時の輝度表現および色表現を測定する
- ・ 対象画像位置において、16[ピクセル]以上の統計量(輝度、彩度の平均値、標準偏差)を計測し、比較する

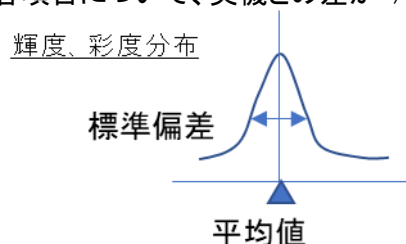


[計測条件]

- ・ 車載
- ・ 既知目標点を用いる
- ・ 既知光源天空光(太陽光、新月)
- ・ 既知の路面(アスファルト、水平)

判定基準

- ・ 各項目について、実機との差が $\pm 20\%$ の範囲

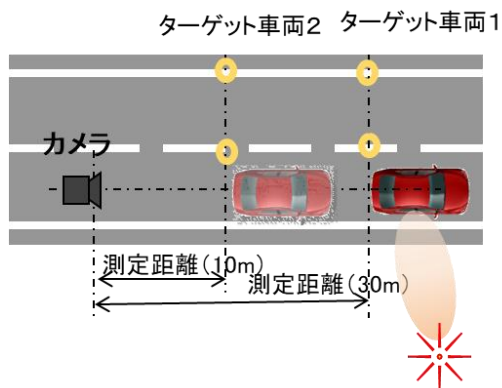


F.2.3.3.11 アセット・シナリオ 認識対象(境界線) 配置

検証方法

認識対象の配置が実機とシミュレーション映像で同等であることを確認する。

- ・ 自車速: 停車 もしくは 5[km/h]程度もしくは 10[km/h]程度
- ・ ターゲット車車速: 停車 もしくは 5[km/h]程度もしくは 10[km/h]程度
- ・ 既知道路(直線、定常円(例: R100 程度))を走行する
- ・ ターゲット車両 1 は乗用車とする
- ・ ターゲット車両 2 は大型車とする
- ・ ターゲット車両 1 との初期車間距離 10[m]付近もしくは 30[m]付近
- ・ ターゲット車両 2 との初期車間距離 10[m]付近
- ・ ターゲット車両1は停車または車間距離を維持する
- ・ ターゲット車両 2 は車間距離を維持する
- ・ ターゲット車両1は自車線を維持する
- ・ ターゲット車両 2 は初期車線を自車線または隣車線とし、車線を維持もしくは車線変更する
- ・ 自車線前方のターゲット車両 1,2 との距離(位置)、相対速度の時系列データおよび実機映像を取得する
- ・ 同シナリオにおいてシミュレーションで映像を作成する
- ・ 境界線上の比較位置の画像上の位置を測定し、比較する



[計測条件]

- ・ 車載
- ・ 既知目標点を用いる
- ・ 既知光源天空光(太陽光、新月)
- ・ 既知の路面(アスファルト、水平)

※参照情報: 中央付近の判定基準において

- ・ 車間距離の計測誤差を1%とする
- ・ ある画像センサでは 水平画素数: 2880 [pixel]
横幅: 8.64×10^{-3} [m]
- ・ レンズ特性として 焦点距離: 7.9×10^{-3} [m]
歪み率: 15%
- ・ 車両諸元より 車両幅: 1.745 [m]

判定基準

各項目について、実機との差が画像上の位置により

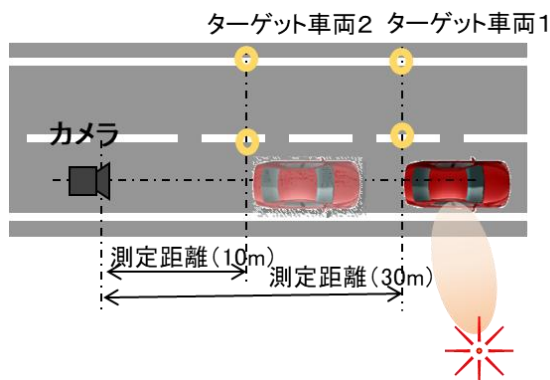
- ・ 中央付近: ± 5 [ピクセル]の範囲
- ・ 周辺付近: ± 30 [ピクセル]の範囲

F.2.3.3.12 アセット・シナリオ 認識対象(境界線) 色彩輝度

検証方法

認識対象の色彩輝度が実機とシミュレーション映像で同等であることを確認する。

- ・ 自車速: 停車 もしくは 5[km/h]程度もしくは 10[km/h]程度
- ・ ターゲット車車速: 停車 もしくは 5[km/h]程度もしくは 10[km/h]程度
- ・ 既知道路(直線、定常円(例: R100 程度))を走行する
- ・ ターゲット車両 1 は乗用車とする
- ・ ターゲット車両 2 は大型車とする
- ・ ターゲット車両 1 との初期車間距離 10[m]付近もしくは 30[m]付近
- ・ ターゲット車両 2 との初期車間距離 10[m]付近
- ・ ターゲット車両1は停車または車間距離を維持する
- ・ ターゲット車両 2 は車間距離を維持する
- ・ ターゲット車両1は自車線を維持する
- ・ ターゲット車両 2 は初期車線を自車線または隣車線とし、車線を維持もしくは車線変更する
- ・ 自車線前方のターゲット車両 1,2 との距離(位置)、相対速度の時系列データおよび実機映像を取得する
- ・ 同シナリオにおいてシミュレーションで映像を作成する
- ・ 境界線上と路面に対して、日が当たっている時と影の時の輝度表現および色表現を測定する
- ・ 対象画像位置において、16[ピクセル]以上の統計量(輝度、彩度の平均値、標準偏差)を計測し、比較する



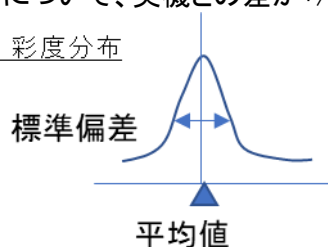
[計測条件]

- ・ 車載
- ・ 既知目標点を用いる
- ・ 既知光源天空光(太陽光、新月)
- ・ 既知の路面(アスファルト、水平)

判定基準

- ・ 各項目について、実機との差が $\pm 20\%$ の範囲

輝度、彩度分布

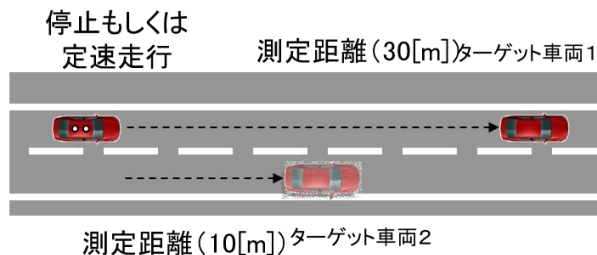


F.2.3.3.13 アセット・シナリオ 認識対象(車両) 距離/速度

検証方法

認識結果が実機とシミュレーション映像で同等であることを確認する。

- ・ 自車速: 停車 もしくは 5[km/h]程度 もしくは 10[km/h]程度
- ・ ターゲット車車速: 停車 もしくは 5[km/h]程度 もしくは 10[km/h]程度
- ・ 既知道路(直線、定常円(例: R100 程度))を走行する
- ・ ターゲット車両 1 は乗用車とする
- ・ ターゲット車両 2 は大型車とする
- ・ ターゲット車両 1 との初期車間距離 10[m]付近もしくは 30[m]付近
- ・ ターゲット車両 2 との初期車間距離 10[m]付近
- ・ ターゲット車両 1 は停車または車間距離を維持する
- ・ ターゲット車両 2 は車間距離を維持する
- ・ ターゲット車両 1 は自車線を維持する
- ・ ターゲット車両 2 は初期車線を自車線または隣車線とし、車線を維持もしくは車線変更する
- ・ 自車前方のターゲット車両 1,2 との距離(位置)、相対速度の時系列データを測定し、定常的なオフセットがある場合は、相関値として求め、必要に応じて相殺して、比較する



判定基準

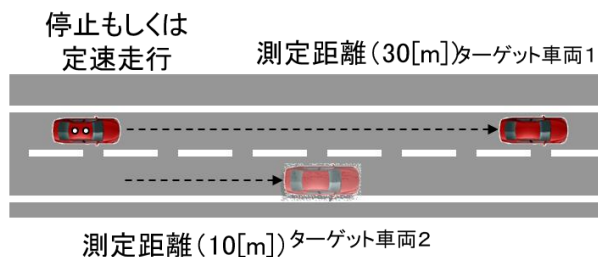
- ・ 距離は、実機との差が $\pm 5\%$ の範囲
- ・ 速度は、実機との差が $\pm 10\%$ の範囲

F.2.3.3.14 アセット・シナリオ 認識対象(車両) サイズ/向き

検証方法

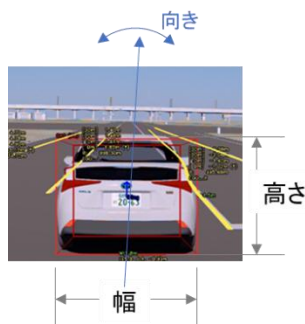
認識結果が実機とシミュレーション映像で同等であることを確認する。

- ・ 自車速: 停車 もしくは 5[km/h]程度 もしくは 10[km/h]程度
- ・ ターゲット車車速: 停車 もしくは 5[km/h]程度 もしくは 10[km/h]程度
- ・ 既知道路(直線、定常円(例: R100 程度))を走行する
- ・ ターゲット車両 1 は乗用車とする
- ・ ターゲット車両 2 は大型車とする
- ・ ターゲット車両 1 との初期車間距離 10[m]付近もしくは 30[m]付近
- ・ ターゲット車両 2 との初期車間距離 10[m]付近
- ・ ターゲット車両1は停車または車間距離を維持する
- ・ ターゲット車両 2 は車間距離を維持する
- ・ ターゲット車両1は自車線を維持する
- ・ ターゲット車両 2 は初期車線を自車線または隣車線とし、車線を維持もしくは車線変更する
- ・ 自車線前方のターゲット車両の高さ、幅、向きの時系列データを測定し、定常的なオフセットがある場合は、相関値として求め、必要に応じて相殺して、比較する



判定基準

- ・ サイズは、実機との差が $\pm 5\%$ の範囲
- ・ 向きは、実機との差が $\pm 5\%$ の範囲

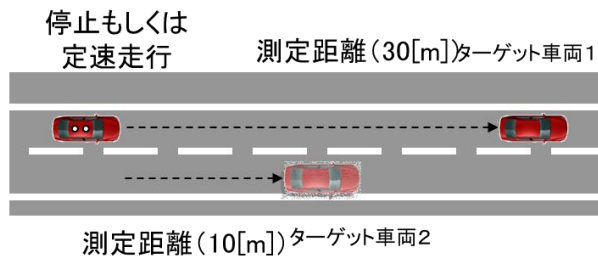


F.2.3.3.15 アセット・シナリオ 認識対象(車両) 種別

検証方法

認識結果が実機とシミュレーション映像で同等であることを確認する。

- ・ 自車速: 停車 もしくは 5[km/h]程度 もしくは 10[km/h]程度
- ・ ターゲット車車速: 停車 もしくは 5[km/h]程度 もしくは 10[km/h]程度
- ・ 既知道路(直線、定常円(例: R100 程度))を走行する
- ・ ターゲット車両 1 は乗用車とする
- ・ ターゲット車両 2 は大型車とする
- ・ ターゲット車両 1 との初期車間距離 10[m]付近もしくは 30[m]付近
- ・ ターゲット車両 2 との初期車間距離 10[m]付近
- ・ ターゲット車両 1 は停車または車間距離を維持する
- ・ ターゲット車両 2 は車間距離を維持する
- ・ ターゲット車両 1 は自車線を維持する
- ・ ターゲット車両 2 は初期車線を自車線または隣車線とし、車線を維持もしくは車線変更する
- ・ 自車線前方のターゲット車両の種別データの時系列データを測定し、比較する
- ・ 種別は、四輪車、歩行者、その他各認識処理で定義される出力種別を対象とする



判定基準

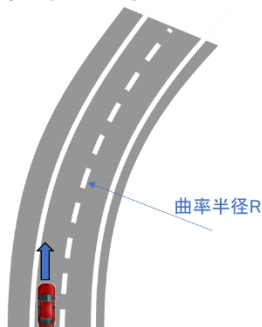
- ・ 種別が一致していること

F.2.3.3.16 アセット・シナリオ 認識対象(境界線) 曲線

検証方法

認識結果が実機とシミュレーション映像で同等であることを確認する。

- ・ 自車速: 停車 もしくは 5[km/h]程度 もしくは 10[km/h]程度
- ・ 既知道路(直線、定常円(例: R100 程度))を走行する
- ・ 走行する定常円区画線(自車から 40[m]程度先までの区間)の曲率半径の時系列データを測定し、定常的なオフセットがある場合は、相関値として求め、必要に応じて相殺して、比較する



判定基準

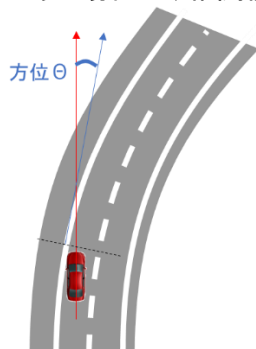
- ・ 曲率は、実機との差が $\pm 15\%$ の範囲

F.2.3.3.17 アセット・シナリオ 認識対象(境界線) 方位

検証方法

認識結果が実機とシミュレーション映像で同等であることを確認する。

- ・ 自車速: 停車 もしくは 5[km/h]程度 もしくは 10[km/h]程度
- ・ 既知道路(直線、定常円(例: R100 程度))を走行する
- ・ 自車を基準に(例: 先端で)走行する区画線の方位の時系列データを測定し、定常的なオフセットがある場合は、相関値として求め、必要に応じて相殺して、比較する



判定基準

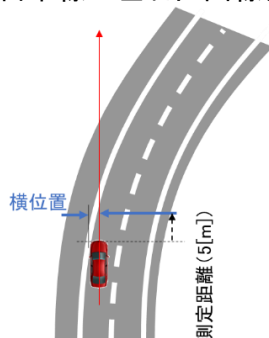
- ・ 方位は、実機との差が $\pm 10\%$ の範囲

F.2.3.3.18 アセット・シナリオ 認識対象(境界線) 横位置

検証方法

認識結果が実機とシミュレーション映像で同等であることを確認する。

- ・ 自車速: 停車 もしくは 5[km/h]程度 もしくは 10[km/h]程度
- ・ 既知道路(直線、定常円(例: R100 程度))を走行する
- ・ 自車を基準に(例: 前方 5[m]程度先で)走行する区画線の横位置の時系列データを測定し、定常的なオフセットがある場合は、相関値として求め、必要に応じて相殺して、比較する
- ・ 自車線の左右区画線を対象とする



判定基準

- ・ 横位置は、実機との差が $\pm 5\%$ の範囲

F.2.3.3.19 アセット・シナリオ 認識対象(境界線) 種別

検証方法

認識結果が実機とシミュレーション映像で同等であることを確認する。

- ・ 自車速: 停車 もしくは 5[km/h]程度 もしくは 10[km/h]程度
- ・ 既知道路(直線、定常円(例: R100 程度))を走行する
- ・ 各区画線の種別データの時系列データを測定し、比較する
- ・ 種別は破線、実線、色、その他各認識処理で定義される出力種別を対象とする



判定基準

- ・ 種別が一致していること

F.3 認識外乱再現要件と妥当性確認方法

この章では、認識外乱再現要件として確認が必要な項目およびそれらの検証方法について解説する。検討の進め方は共通要件と同様である。

まず認識外乱再現要件として設定する項目について、どのような項目を設定するかについての考え方を整理する。その後この考え方に従って各センサの検証方法について整理する。この検証方法はセンサ原理に基づいて設定されるため、センサ原理の違う物を取り扱う場合は同様の考え方で確認項目を整理し、確認することが必要となる。なお、ここで整理した以下検証方法は、同等の内容が検証できる他の方法で代替することも可能である。また、各センサについて、キャリブレーションに相当する調整がある場合には、調整をしたうえで検証を実施する事を想定している。

F.3.1 認識外乱再現要件の考え方

ここでは認識外乱再現要件として設定する項目について考え方を整理する。共通要件で実施したのと同じように、認識外乱の要因を①センサ・車両自身、②信号の伝播する空間、③認識対象物 とに分け(図3)、各々について外乱を付与した環境において検証するべき項目とその基準値について整理する。また、これらを総合して確認するため、基本的な交通流シナリオにおいて外乱を与えた条件下で認識対象物が認識できるかを確認する方法を定義する。

F.3.2 各センサにおける認識外乱再現要件の考え方

F.3.2.1 ミリ波レーダについての認識外乱再現要件の考え方

ミリ波レーダでは、その知覚原理に基づき、距離・方位・相対速度および受信電波強度などの物理量が正しく再現されているかを、外乱を与えた環境下で検証する(図 F-4)。

具体的な要件を整理したものを表 F-4 に示す。

表 F-4: ミリ波レーダにおける認識外乱再現要件一覧

						知覚起因																認識処理起因							
						認識対象からの信号S								認識対象を阻害する信号								処理能力	処理性能						
						位相			強度					ノイズ(N)				不要信号(U)					ディテクション (対象の反射点群出力)		クラスタリング (反射点群のグループ化)	トラッキング (対象の追跡)	クラシフィケーション (対象の識別)		
						到来方向変化		伝搬遅延 変化	Sなし(部分 的)	S強すぎ		S強度差 大	低S/N				低D/U				U増大								
項目	パラメータ	要求内容	妥当性 検証方法 No.	外乱無し	周波数	反射(間 接波)	屈折			部分遮蔽	折返し		高調波	方位角変化による低 S/N (縦/横方位角変化)	センサ表面での 減衰による低 S/N	空間減衰 による低 S/N	低い再帰 反射率に よる低 S/N	方位角変化による低 D/U (垂直/水平方位角 変化)	路面反射 による低 D/U	構造物に よる低 D/U		空間浮遊 物による 低D/U	他車セン サによる 低D/U	自車の他 センサに よる低 D/U	路面反射 によるU増 大	処理点数不足 演算能力不足	Uの誤検出	Sの未検出	認識想定外の点 群分布
外乱の 再現性検証	S強度差大の再 現	外乱現象の再 現	信号強度比	距離・角度	認識対象物1と2の信号の強度比が、実環境と同等であること	3-1					○																		
			半値幅比	距離・角度	認識対象物1と2の信号の半値幅比が、実環境と同等であること	3-2							○																
			信号の埋もれ	距離・角度	認識対象物2の信号が、実環境と同様に見えなくなること	3-3																							
	路面マルチパス による低D/Uの 再現	外乱現象の再 現	受信電力	距離	認識対象物からの受信電力包絡線が実環境と同等であること	4-1											○												
			受信電力	距離	C/Rからの反射波の受信電力について、エンベロープが実環境と同等であること	4-2												○											
			ヌル点	距離	C/Rからの反射波の受信電力について、ヌル点距離が実環境と同等であること	4-3													○										
	方位角変化による 低D/Uの再現	外乱現象の再 現	信号の埋もれ	距離・角度	認識対象物の信号が、実環境と同様に標識看板の信号に埋もれて見えなくなること	5-1										○													
			信号強度比	距離・角度	認識対象物と標識看板の信号の強度比が、実環境と同等であること	5-2											○												
			半値幅比	距離・角度	認識対象物と標識看板の信号の半値幅比が、実環境と同等であること	5-3											○												
	車両の向きによる 低S/N	外乱現象の再 現	受信電力の累積分布	車両角度	ある車間距離区間における受信電力累積分布が、実環境と同等であること	6-1									○														

F.3.2.2 LiDAR についての認識外乱再現要件の考え方

LiDAR では、その知覚の原理から、距離・方位・強度・検出点数・大きさなどの物理量が再現されているかどうかを検証する(図 F-5)。

具体的な要件を整理したものを表 F-5 に示す。

表 F-5: LiDAR における認識外乱再現要件一覧

外乱の 再現性検証	ノイズ	計測距離の 誤差平均と バラツキ	LiDAR正面に標準反射板を設置し、距離を変化させて計測距離の誤差平均と分散を測定し、実測との差分が判定基準内である事を検証	標準反射板	光源	高度	下記の範囲でパラメータを変化させた際に、計測距離の誤差平均およびバラツキの実測との差異が判定基準を満たすこと。	F.2.4.2.1														○	○				
						方位	・高度：20～90度 ・方位：-180～-150度、150～180度 ・明るさ：ハロゲンランプ等を用いる場合は太陽が上記角度条件にある時のターゲット面上放射照度値とする。 LiDARにより波長域が異なる可能性があるため、使用機種 of 取得する範囲で設定する															○	○				
						明るさ																○	○				
		受信強度と 検出確率	LiDAR正面に標準反射板を設置し、距離を変化させて受信強度と検出確率を測定し、判定基準内である事を検証	標準反射板	光源	高度	下記の範囲でパラメータを変化させた際に、受信強度および検出確率の実測との差異が判定基準を満たすこと。	F.2.4.2.2														○	○				
						方位	・高度：20～90度 ・方位：-180～-150度、150～180度 ・明るさ：ハロゲンランプ等を用いる場合は太陽が上記角度条件にある時のターゲット面上放射照度値とする。 LiDARにより波長域が異なる可能性があるため、使用機種 of 取得する範囲で設定する															○	○				
						明るさ																○	○				
		受信点数	LiDAR正面にアセットを設置し、距離を変化させて受信点数の差異を検証	アセット (車両・バイク・人・設置物・落下物)	光源	高度	下記の範囲でパラメータを変化させた際に、受信点数の実測との差異が判定基準を満たすこと。	F.2.4.2.3														○	○				
						方位	・高度：20～90度 ・方位：-180～-150度、150～180度 ・明るさ：ハロゲンランプ等を用いる場合は太陽が上記角度条件にある時のターゲット面上放射照度値とする。 LiDARにより波長域が異なる可能性があるため、使用機種 of 取得する範囲で設定する															○	○				
						明るさ																○	○				
	S減衰	減衰外乱の 再現性	LiDAR正面にアセットを設置し、距離を変化させて受信点数の差異を検証	車両	リフレクタ	形状	下記のように形状・色・材質を変化させた際に、受信点数の実測との差異が判定基準を満たすこと。	F.2.4.2.4					○														
					鏡面反射板	色、材質	・形状：地上高の高い車両、車高の低い車両、バイク、自転車、角張った車両、丸みのある車両 ・色・材質：黒い塗装、鏡面反射						○														

F.3.2.3 カメラセンサについての認識外乱再現要件の考え方

共通要件の項で示した通り、カメラセンサは距離情報を知覚部で取得することは不可能である一方、色情報を取得することが出来るため、この特性が外乱下でのカメラにおける一致性検証で重要である。

具体的な要件を整理したものを表 F-6 に示す。

表 F-6: カメラセンサにおける認識外乱再現要件一覧

妥当性検証							知覚処理														認識処理																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
							光学系				イメージセンサ						画像処理				特徴抽出		識別		位置推定		トラッキング																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
項目／対象部位							計測項目							パラメータ							要求内容							No.							外見なし(意図)		外見なし(夜間)		ばけ、位置ずれ・変形		(ひかりさそひ)の重複(繰り返しみ)		(フレア)		(線フレア)		(周辺漏光)		(色あせ)		(画像ブレ)		(フリッカ)		(ローリングシャッター歪)		白飛び(露光時間/フタ)		白飛び+フレア(逆光)		(黒つぶれ)		(黒つぶれ)		(適正露出外)		(WBずれ)		彩度		遮断(見切れ)		空間周波数低		低コントラスト		分類なし		分類誤り		基準位置誤り		対象不良		速度認識不良																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
項目／対象部位							計測項目							パラメータ							要求内容							No.							外見なし(意図)		外見なし(夜間)		ばけ、位置ずれ・変形		(ひかりさそひ)の重複(繰り返しみ)		(フレア)		(線フレア)		(周辺漏光)		(色あせ)		(画像ブレ)		(フリッカ)		(ローリングシャッター歪)		白飛び(露光時間/フタ)		白飛び+フレア(逆光)		(黒つぶれ)		(黒つぶれ)		(適正露出外)		(WBずれ)		彩度		遮断(見切れ)		空間周波数低		低コントラスト		分類なし		分類誤り		基準位置誤り		対象不良		速度認識不良																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
認識不良の原理	(路面：直線、アスファルト)	遮蔽	配置検証(遮蔽物)	形状、サイズ	認識対象について、 実環境と同等であること	B-1-1-1	レ	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

F.3.3 認識外乱再現要件の妥当性確認方法

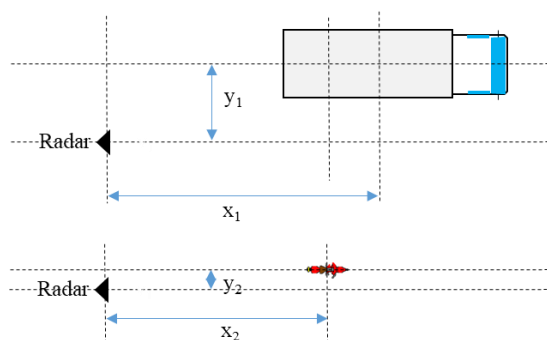
各センサについて、F.3.2 で定義した各要件項目の検証方法を記述する。

F.3.3.1 ミリ波レーダの認識外乱再現性要件と妥当性確認方法

■S 強度差大の再現 : 外乱現象の再現 信号強度比/半値幅比

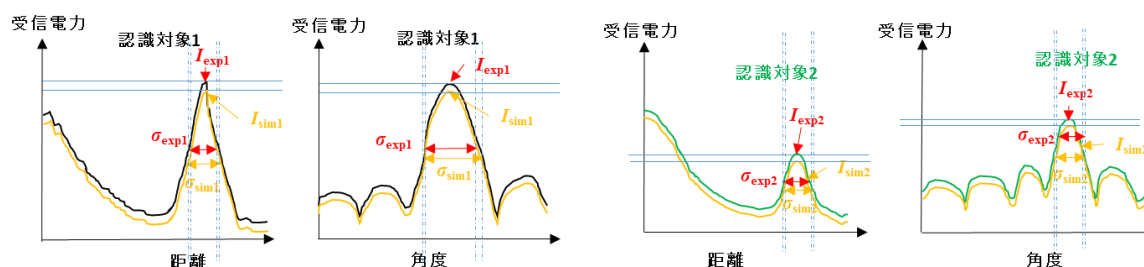
検証方法

- ・ 反射強度が異なる大型車両等の大型車両(認識対象 1)とバイク等の小型の車両(認識対象 2)を用い評価
- ・ 水平直線路上に認識対象を置き速度(0km/h)の静止状態で評価
- ・ 認識対象 1 と認識対象 2 を個別に評価する
- ・ 評価における位置関係(参考)
- ・ $x_1:150(\text{m})$ $x_2:140(\text{m})$ $y_1:3.5(\text{m})$ $y_2:1(\text{m})$
- ・ 実環境と仮想環境で信号強度比 $I_{\text{exp1}}/I_{\text{exp2}}$ $I_{\text{sim1}}/I_{\text{sim2}}$ と半値幅 $\sigma_{\text{exp1}}/\sigma_{\text{exp2}}$ $\sigma_{\text{sim1}}/\sigma_{\text{sim2}}$ を比較する
exp : 実機実験, sim : 仮想環境
認識対象の位置



判定基準

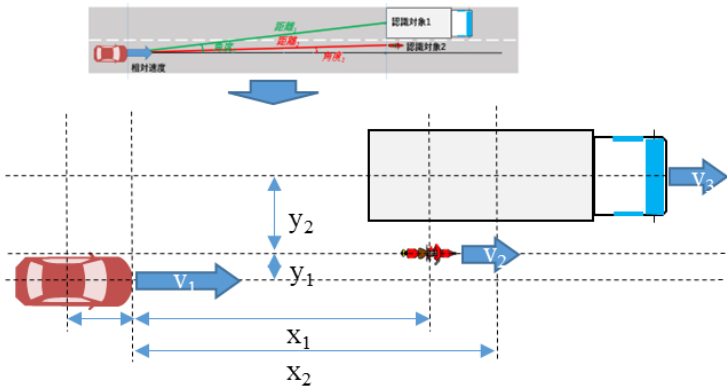
- ・ 実環境と仮想環境で信号強度比 $I_{\text{exp1}}/I_{\text{exp2}}$ $I_{\text{sim1}}/I_{\text{sim2}}$ と半値幅 $\sigma_{\text{exp1}}/\sigma_{\text{exp2}}$ $\sigma_{\text{sim1}}/\sigma_{\text{sim2}}$ の差異が $\pm 5\%$ 以内



■S 強度差大の再現 : 外乱現象の再現 信号の埋もれ

検証方法

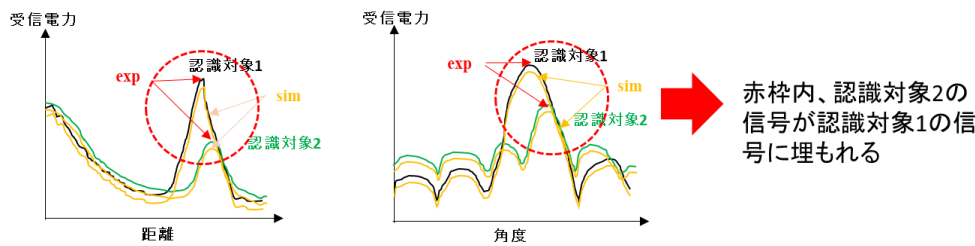
- ・ 反射強度が異なる大型車両等の大型車両(認識対象 1)とバイク等の小型の車両(認識対象 2)を用い評価
- ・ 水平直線路を走行し評価
- ・ 認識対象 1 と認識対象 2 は隣接する車線を並走、自車に対し接近する方向に移動させ評価
- ・ 認識対象 1 と認識対象 2 は自車に対する相対速度が同じ場合と異なる場合の 2 パターンで評価
- ・ 初期位置及び相対速度(参考)
- ・ $x1:140(m)$ $x2:150(m)$ $y1:1(m)$ $y2:2.5(m)$
- ・ 相対速度: $v1-v2=10(km/h)$ 程度
 - $v2-v3=0\sim10(km/h)$ 程度
- ・ 実環境と仮想環境で信号強度が弱い認識対象 2 が認識対象 1 の信号に埋もれるか確認する



現象パラメータ	原理パラメータ	外乱要因パラメータ	外乱要因	パラメータの範囲	考え方	要因分類
信号強度	認識対象距離	—	—	対象物距離(r_a)最小検知距離～最大検知距離	レーダの知覚部分を評価するために距離はレーダのスペックに基づく範囲で検証	外乱要因以外
	アンテナ利得	—	—	対象物角度(θ_a)FOVの範囲内	レーダのスペックに基づきFOV内でパラメータを振り検証	
	—	センサー角度	センサー軸ズレ	軸ズレ角度 $0\sim\pm Xdeg$	軸ズレ自動検知が作動する最小角度	外乱要因
	認識対象物の形状	認識対象物の形状3D)	人及び道路交通法に基づく自動車に分類される認識対象物最初のSTEPとして大型自動車と普通自動二輪車	人及び道路交通法に基づく自動車に分類される認識対象物最初のSTEPとして大型自動車と普通自動二輪車	自専道走行可能な車両+緊急時の停車車両横を歩行する人を考慮	
	再起反射率 RCS値(σ_a)	認識対象物大きさ	認識対象物大きさ	車両:原動機付き自転車相当～大型自動車相当 人:---	自専道走行可能な車両+緊急時の停車車両横を歩行する人を考慮	
	車両の材質	—	色	ミリ波帯の反射、透過率データに基づき設定	可視光の色とミリ波帯の物性値の相関は無いためデータベースが必要	
			材質	ミリ波帯の物性値データに基づき設定	ミリ波帯の物性値データベースが必要	
認識対象物の組み合わせ	—	—	—	人、及び道路交通法に基づく自動車に分類される認識対象物	自専道走行可能な車両+緊急時の停車車両横を歩行する人を考慮	

判定基準

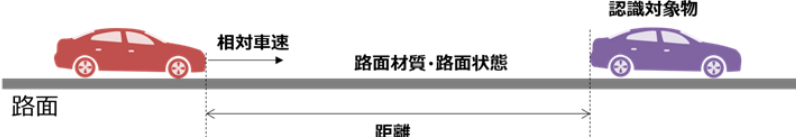
- ・ 実環境と仮想環境で信号強度の弱い認識対象 2 が信号強度の強い認識対象 1 の信号に埋もれ、検出できなくなる現象が再現されること



■ 路面マルチパスによる低 DU の再現： 外乱現象の再現 受信電力

検証方法

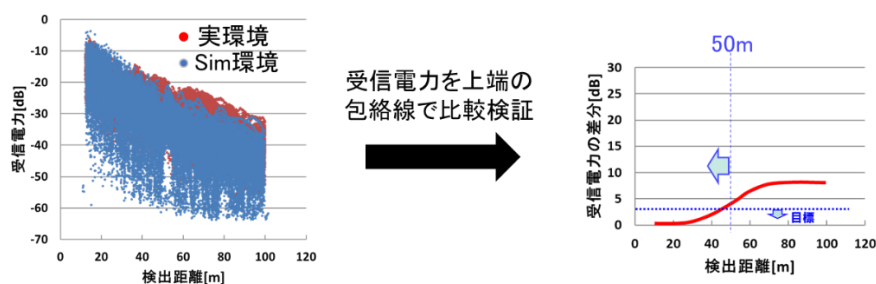
- ・ 「低 D/U(路面マルチパス)」評価シナリオを再現する: 自車線前方の認識対象物(静止車両)に接近する
- ・ 対象物までの距離: センサ最小検知距離～最大検知距離
- ・ 相対速度: (例) 20km/h 程度
- ・ 対象物種類: 乗用車、大型トレーラなど
- ・ 路面材質: アスファルト、鉄板など
- ・ 路面状態: 通常、ウェット



パラメータ項目	変化／固定	範囲	説明
対象物までの距離	変化	最小検知距離～最大検知距離	センサスベックに基づく範囲で検証
相対車速	固定	ODD内の最高速度	
対象物の種類	固定	大型車(車高:高) 普通車(車高:中) 小型車(車高:低)	大型車、普通車、小型車などの代表例を3水準
路面材質	固定	アスファルト / 鉄板など	代表的な路面材質／鏡面反射率の高い路面材質
路面状態	固定	通常 / ウェット	通常の路面状態／鏡面反射率の高い路面状態

判定基準

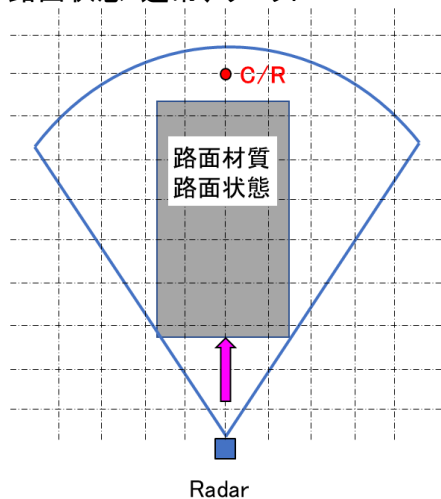
- ・ 相対距離 50m 以下での、受信電力包絡線の差異: 3dB 以下



■ 路面マルチパスによる低 DU の再現:路面材質・路面状態 受信電力/ヌル点

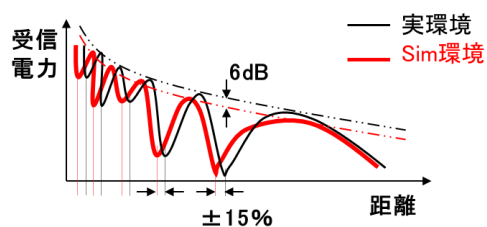
検証方法

- Radar 正面にコーナリフレクタ(C/R)を設置し、コーナリフレクタ(C/R)に向かって Radar を移動
- 路面材質:アスファルト、鉄板など
- 路面状態:通常、ウェット



判定基準

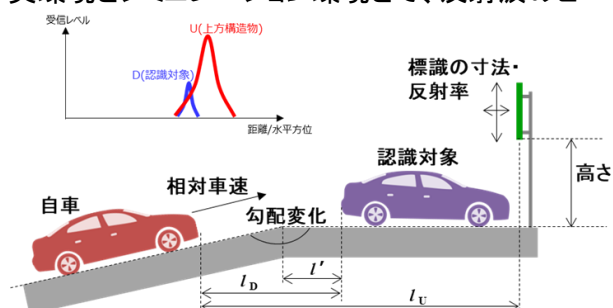
- エンベロープの差異:6dB 以下
- ヌル点距離の差異:±15% 以下



■方位角変化による低 D/U の再現：外乱現象の再現 信号の埋もれ

検証方法

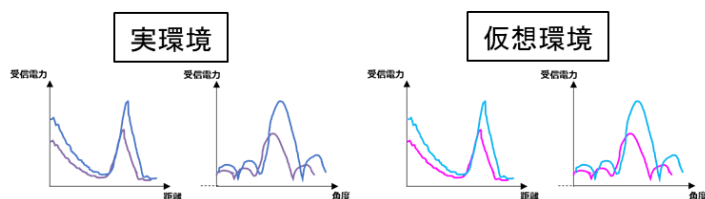
- 「方位角変化による低 D/U」評価シナリオを再現：
 - 上に凸の勾配変化のある道路を走行する
 - 前方、勾配変化した先に金属製の標識看板がある
 - 自車線前方、標識の近くにある停止車両に接近する
- ※ 勾配について：同等条件（レーダ搭載角度変更など）への置き換えも可とする
- 勾配変化： $3 \sim 10^\circ$ の範囲で 2 点
- l' ：5 (m) 固定
- l_D 初期値：15 (m)
- l_U 初期値：20 (m)
- 認識対象物の種類：乗用車
- 実環境とシミュレーション環境とで、反射波のピーク強度比 I_D/I_U を比較する



パラメータ		パラメータ範囲	考え方
外乱要因	縦断勾配の変化	変化 0 ~ 18 %相当	上に凸な路面で代表させる
外乱要因以外	認識対象までの距離 初期値 l_D	固定 衝突回避に必要な距離	
	変曲点から認識対象までの距離 l'	変化 0 ~ l_D	
	認識対象の横位置	固定 0°	同一車線上に固定
	標識までの距離 初期値 l_U	変化 $l_D - 5 \sim l_D + 5$ (m)	
	標識の横位置	変化 $-3.5 \sim +3.5$ (m)	隣接車線上の設置物まで想定
	標識の高さ(下端まで)	固定 4.5m(車道上方) / 1.5m(路側式)	「道路標識設置基準」より
	標識看板の寸法	固定 2.7 × 3.5 (m)	高速道路の案内標識
	標識看板の反射率	固定 (実際の標識看板の測定値)	
	相対車速	固定 ODD内の最高車速	
	認識対象の種類	固定 乗用車 / 歩行者	交通参加者の代表 / 低反射率

判定基準

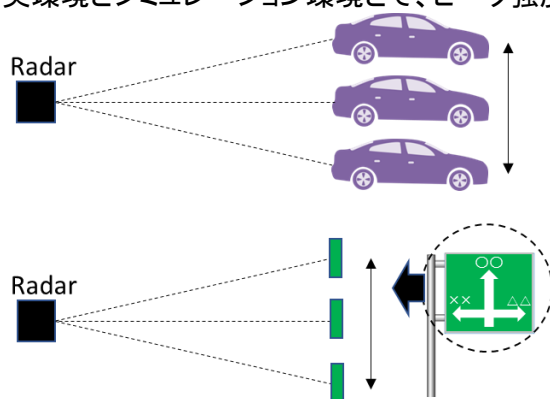
- 標識看板の信号に認識対象物の信号が埋もれる現象が、実環境と仮想環境とで同様に起こることを確認



■方位角変化による低 D/U の再現: 上方構造物の反射特性 信号強度比／半値幅比

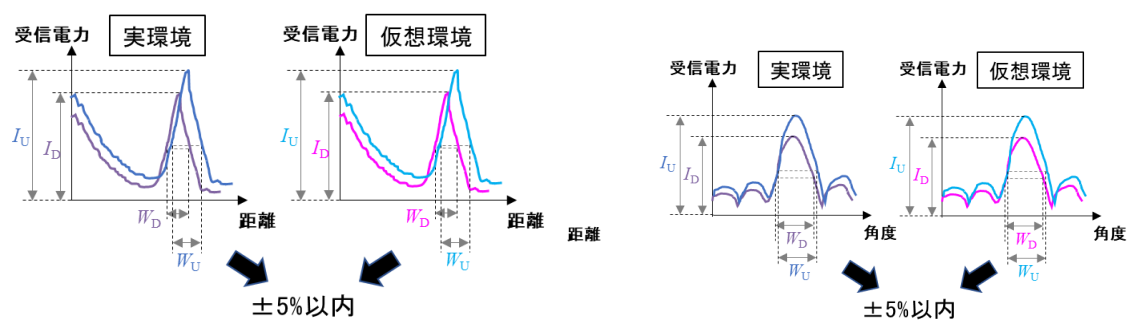
検証方法

- ・ 認識対象の乗用車／道路標識平板部にレーダ電磁波を照射する
- ・ 乗用車／標識とレーダとの角度を鉛直面内で変化させる角度: 0° , $\pm 5^\circ$, $\pm 10^\circ$
- ・ 測定距離: 15, 20 (m)
- ・ 実環境とシミュレーション環境とで、ピーク強度比 I_D/I_U および ピーク半値幅比 W_D/W_U を比較する



判定基準

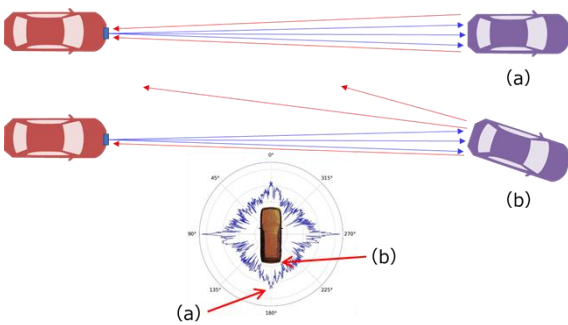
- ・ 実環境と仮想環境における I_D/I_U , W_D/W_U の差異: $\pm 5\%$ 以内



■車両の向きによる低 S/N

検証方法

- 「車両の向きによる低 D/U」評価シナリオを再現する：
 - 直線路上の前方に車両を静止させ、低速で接近走行する
 - 前方の車両の設置角度を変えて走行する
- 車両設置角度：0, 10, 30 (°)
- 初期車間距離：150 (m)
- 車両速度：20 (km/h) 以下
- 認識対象物の種類：乗用車（一般的な車両）
- 実環境とシミュレーション環境とでそれぞれ、受信電力を記録して比較する

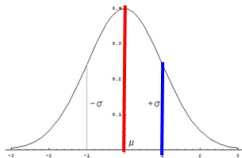


パラメータ項目	変化／固定	範囲	説明
対象物の種類	変化	・投影面積（大、中、小） ・散乱への寄与率＝反射率 （金属多用、非金属多用、中間） ・散乱波の指向性 （一様、偏りあり）	・面積はだまかに3水準とする ・内部まで全て非金属の車両は無く、3水準 ・車両の微小部位における法線ベクトルの密度に依存し3水準
対象物の向き	変化	0°～30°	道路線形（カーブR）に準ずる
対象物までの距離	変化	150～5m	
相対車速	固定	20kph 以下（定速）	

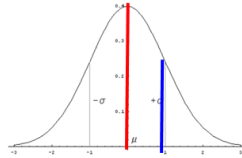
判定

基準

- ある車間距離区間（例：10～20m）における受信電力（dBm）の累積分布を示し、平均、分散の各々で比較：±10%以内



受信電力の累積分布(実測)



受信電力の累積分布(Sim.)

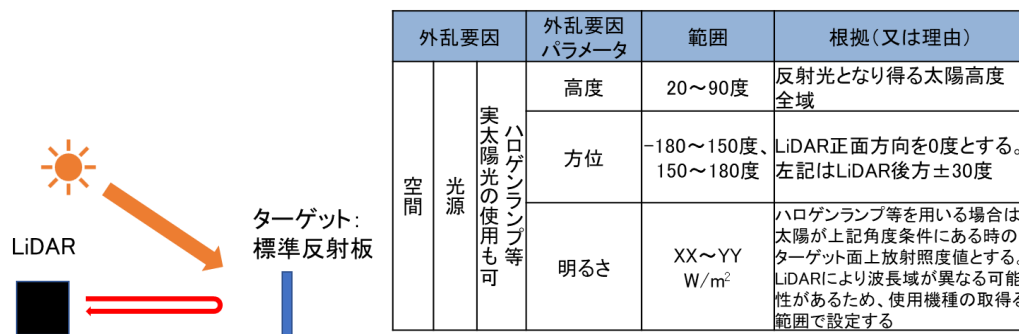
F.3.3.2 LiDAR の認識外乱再現要件と妥当性確認方法

■ノイズ： 計測距離の誤差平均とバラツキ

当検証は Annex E 3.2.2.2 記載の「反射光による外乱光の場合」に対応する評価として実施するものとする。

検証方法

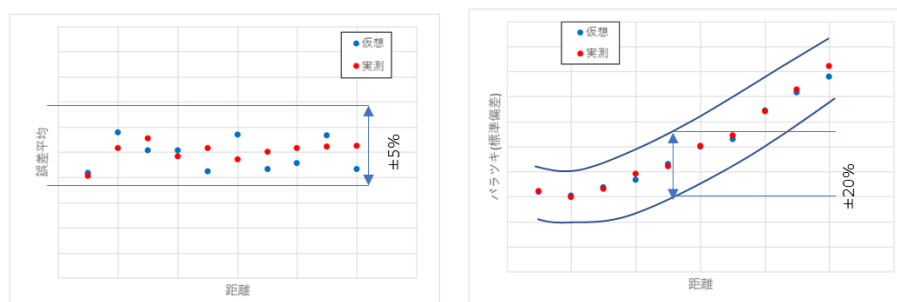
- LiDAR の正面に標準反射板を設置し、距離を変化させて計測距離の誤差平均と分散を測定し、実測との差分が判定基準内であること



上記パラメータ範囲からターゲット上の放射照度が最大付近となる条件を選択して検証を実施する。ノイズレベルを再現できるのであれば、固定入射角で放射照度値のみをパラメータとして検証することを可とする。

判定基準

- 誤差平均:対象までの距離の±5%以内 σ :±20%以内



■ ノイズ： 受信強度と検出確率

当検証は Annex E 3.2.2.2 記載の「反射光による外乱光の場合」に対応する評価として実施するものとする。

検証方法

- LiDAR の正面に標準反射板を設置し、距離を変化させて受信強度と検出確率を測定し、判定基準内であること

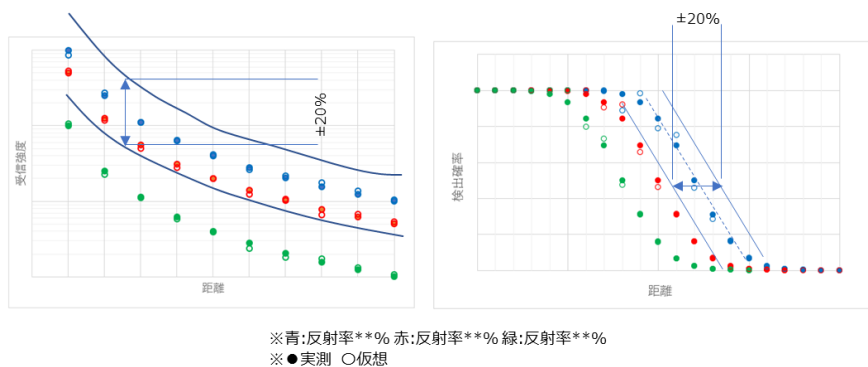
外乱要因			外乱要因 パラメータ	範囲	根拠(又は理由)
空間	光源	実太陽光の使用も可 ハロゲンランプ等	高度	20～90度	反射光となり得る太陽高度 全域
			方位	-180～150度、 150～180度	LiDAR正面方向を0度とする。 左記はLiDAR後方±30度
			明るさ	XX～YY W/m ²	ハロゲンランプ等を用いる場合は 太陽が上記角度条件にある時の ターゲット面上放射照度値とする。 LiDARにより波長域が異なる可能性 があるため、使用機種の取得する 範囲で設定する

上記パラメータ範囲からターゲット上の放射照度が最大付近となる条件を選択して検証を実施する。

ノイズレベルを再現できるのであれば、固定入射角で放射照度値のみをパラメータとして検証することを可とする。

判定基準

- 実測値との強度誤差:±20%以内
- 実測との検出確率差@検出確率 90%:±20%以内
- 実測との検出確率差@検出確率 50%:±20%以内
- 実測との検出確率差@検出確率 10%:±20%以内

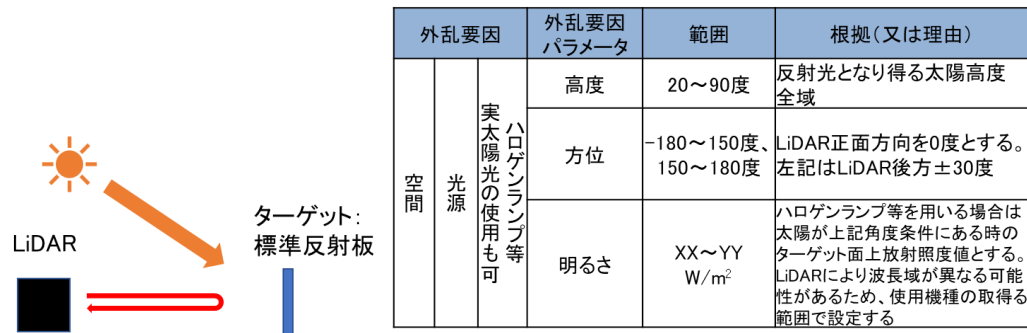


■ ノイズ： 受信点数

当検証は Annex E 3.2.2.2 記載の「反射光による外乱光の場合」に対応する評価として実施するものとする。

検証方法

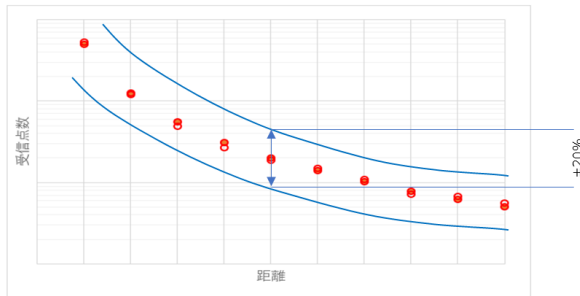
- LiDAR 正面にアセットを設置し、距離を変化させて受信点数の差異を検証する



上記パラメータ範囲からターゲット上の放射照度が最大付近となる条件を選択して検証を実施する。

判定基準

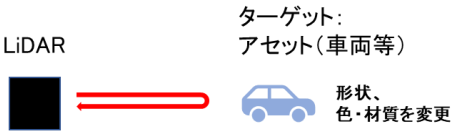
- 実測点数との誤差±20%以内（受信点数が少なくなる遠方は除外）



■ S 減衰： 減衰外乱の再現性 減衰認識対象の再現

検証方法

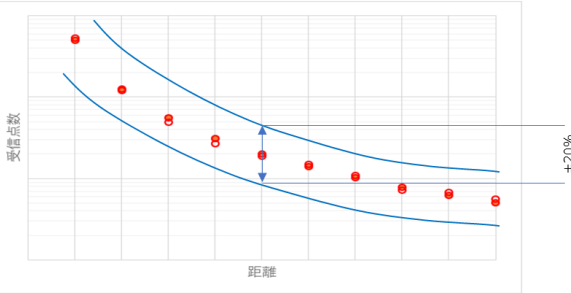
- ・ LiDAR 正面にアセットを設置し、距離を変化させて受信点数の差異を検証



外乱要因	外乱要因パラメータ	範囲	根拠（又は理由）
車両	形状	<ul style="list-style-type: none"> ・地上高の高い車両 ・車高の低い車両 ・バイク、自転車 ・角張った車両 ・丸みのある車両 	<ul style="list-style-type: none"> ・ボデー下をすり抜け、タイヤのみから反射 ・荷台部分は上レイヤーのビームが当たりづらい ・水平方向の反射点数が少ない ・向きによって法線の向きがLiDARと正対しづらい ・法線の向きがLiDARと正対しづらい
	色、材質	<ul style="list-style-type: none"> ・黒い塗装 ・鏡面反射 	<ul style="list-style-type: none"> ・拡散反射成分が少ない ・向きにより鏡面反射して返ってこない

判定基準

- ・ 実測点数との誤差±20%以内（受信点数が少なくなる遠方は除外）



F.3.3.3 カメラセンサの認識外乱再現要件と妥当性確認方法

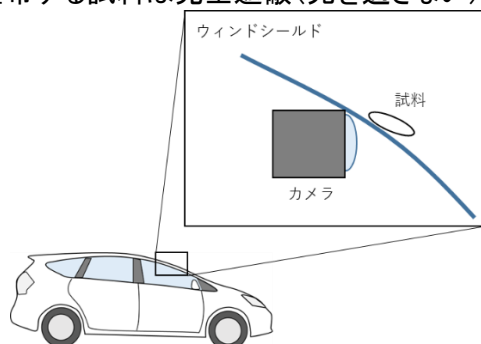
■遮蔽 配置検証(遮蔽物)・色彩輝度検証(遮蔽物)

1. センサ前面付着物 知覚部一致性

検証方法

車輛静止状態でウインドシールド上に試料を塗布し検証を行う。評価方法は共通要件と同様。但し、試料の物理的な位置合わせが困難な場合、遮蔽物端の画素値のプロファイルで比較を行ってもよい。(F.2.3.3.1 単体カメラ モジュールの調整 画角/光軸/歪み F.2.3.3.2 単体カメラ モジュールの調整 色彩輝度)

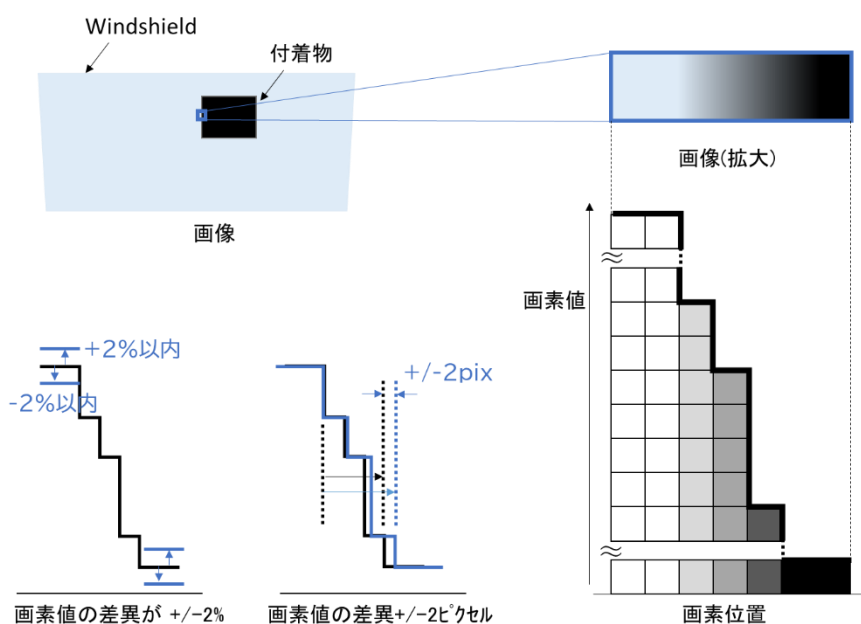
塗布する試料は完全遮蔽(光を通さない)物とする。



判定基準

- ・ 遮蔽部と非遮蔽部の各々で実機と画素値の差異が $\pm 2\%$ 以下かつ、遮蔽部と非遮蔽部の画像上の距離の差異が ± 2 [ピクセル]以内

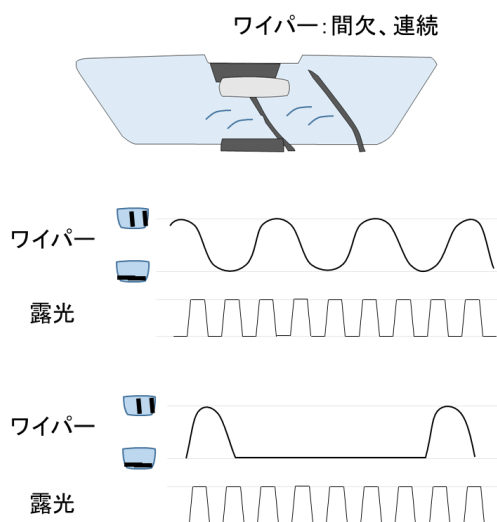
補足)



2. センサ前面障害物 知覚部一致性

検証方法

- ・ 時間変化する要素としてワイパー映り込みの再現を検証する。ワイパー動作、シャッタースピードなど時間変化に関する項目を評価する。



判定基準

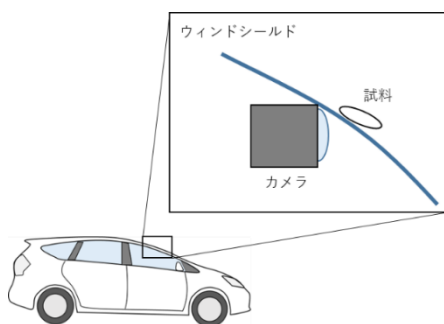
- ・ 露光タイミングとワイパー動作の時間変化が一致すること
- ・ 同状態の画像に対する画素値の差異 5%以下

■遮蔽 配置検証(物標)・色彩輝度検証(物標)

1. センサ前面付着物 知覚部一致性

検証方法

車輛静止状態でウインドシールド上に試料を塗布し、検証を行う。評価方法は共通要件と同様。
(F.2.3.3.9, F.2.3.3.10)



判定基準

- ・ 遮蔽部と非遮蔽部の各々で実機と画素値の差異が $\pm 2\%$ 以下かつ、遮蔽部と非遮蔽部の画像上の距離の差異が ± 2 [ピクセル] 以内

■遮蔽 認識結果(物標)

認識外乱要因					特徴抽出		
					遮蔽		
					(対象が見えない)		
モデル化 分類		要因分類		不調概要	車両側で見 れない	対象側で見 れない	死角
				不調内容			
要因項目(具体例)							
車面・センサ	センサ前面	付着物・障害物	① 遮蔽 - 泥・埃 等	泥・塵などの付着 (画像欠損)	3	-	-
			遮蔽 - 雪・氷 等	雪・氷などの付着 (画像欠損)	3	-	-
			遮蔽 - 水 等	水などの付着 (画像欠損)	2	-	-
			遮蔽 - 虫・鳥糞 等	虫・鳥糞などの付着 (画像欠損)	2	-	-
			② 遮蔽 - ファイバー	ファイバ動作 (画像欠損)	1	-	-
周辺環境	周辺構造物	路面	③ 形状	勾配			3
	周辺移動物		遮蔽④ 非透過物	駐車車両、街路樹、飛来物			3
認識対象	走路	区画線	汚れ・剥れ	落ち葉、積雪などによる部分的な隠れ 汚れ、かすれ、引き直し		3	-
	移動物	⑤ 他車両	付着物	色	付着物基準色 (車両の色と類似～相違)	1	-
				形状	付着物様々な形 (泥やシールなどの形状、模様)	1	-
				範囲	付着範囲 (一部分～車体全体)	3	-

(原理×要因マトリックスより)

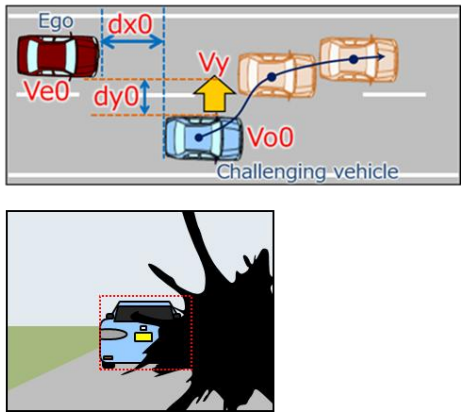
上記 5 分類について、各々妥当性検証方法を示す。

1. センサ前面付着物

F-1：直線路での Cut-in シナリオ

検証方法

- 付着物により視野が制限されている状態で、認識対象物が自車線前方に一定横速度で進入する

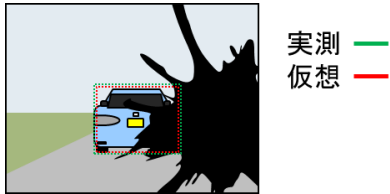


参考：評価シナリオパラメータ

パラメータ項目	変化／固定	範囲
対象物までの距離	変化	最も遅い速度でのCut-in距離からセンサの最大検知距離まで 横位置 dy_0 ：3.5m
対象物との相対車速	変化	ALKSでのpreventable基準に照らし最も早い速度と遅い速度
対象物の種類	固定	形状：セダン 色：白
付着物(外乱要因)による認識対象の遮蔽率	変化	認識対象のバウンディングボックスに対して ① 初期50% → 最終0% ② 初期100% → 最終50%

判定基準

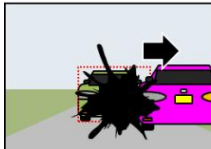
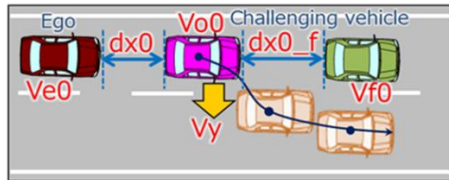
- 縦距離の差異：5% 以下
 - 横距離の差異：5% 以下
 - 縦相対速度の差異：10% 以下
 - 横相対速度の差異：10% 以下
 - 幅、高さの差異：5% 以下
- 但し、判定は認識出来ているフレームでのみ行う



シナリオ F-2:直線路での Cut-out シナリオ

検証方法

- ・ 遮蔽されている位置から前走車がカットアウトする。認識対象は前走車、前前走車の両方とする。

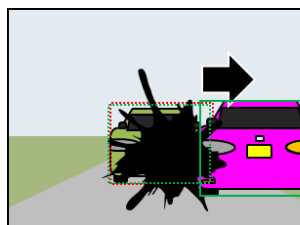


参考:評価シナリオパラメータ

パラメータ項目	変化/固定	範囲
対象物までの距離	変化	最も遅い速度でのCut-out距離からセンサの最大検知距離まで
対象物との相対車速	変化	カットアウトシナリオでのpreventable基準に照らし最も早い速度と遅い速度
対象物の種類	固定	形状:セダン 色:白
付着物(外乱要因)による認識対象の遮蔽率	変化	認識対象(前走車)のバウンディングボックスに対して ① 初期50% → 最終0% ② 初期100% → 最終50%

判定基準

- ・ 縦距離の差異: 5% 以下
 - ・ 横距離の差異: 5% 以下
 - ・ 縦相対速度の差異: 10% 以下
 - ・ 横相対速度の差異: 10% 以下
 - ・ 幅、高さの差異: 5% 以下
- 但し、判定は認識出来ているフレームでのみ行う



実測 ——— 緑
仮想 ——— 赤

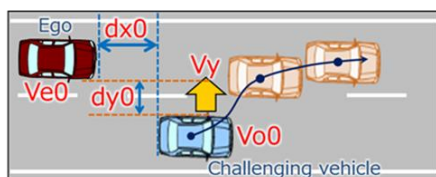
2. センサ前面阻害物

シナリオ F-1: 直線路での Cut-in シナリオ

検証方法

- ワイパー動作させた状態で、認識対象物が自車線前方に一定横速度で進入する

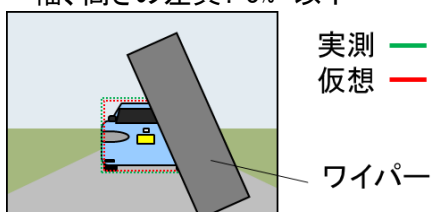
参考: 評価シナリオパラメータ



パラメータ項目	変化/固定	範囲
対象物までの距離	変化	最も遅い速度でのCut-in距離からセンサの最大検知距離まで 横位置dy0: 3.5m
対象物との相対車速	変化	ALKSでのpreventable基準に照らし最も早い速度と遅い速度
対象物の種類	固定	形状: セダン 色: 白
ワイパー動作	固定	① 間欠 ② 連続

判定基準

- 縦距離の差異: 5% 以下
- 横距離の差異: 5% 以下
- 縦相対速度の差異: 10% 以下
- 横相対速度の差異: 10% 以下
- 幅、高さの差異: 5% 以下

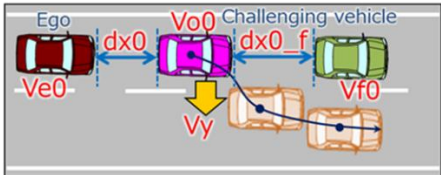


シナリオ F-2:直線路での Cut-out シナリオ

検証方法

- ワイパー動作しながら認識対象がカットアウトする

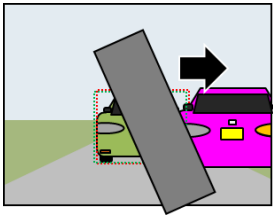
参考:評価シナリオパラメータ



パラメータ項目	変化／固定	範囲
対象物までの距離	変化	最も遅い速度でのCut-out距離からセンサの最大検知距離まで
対象物との相対車速	変化	カットアウトシナリオでのpreventable基準に照らし最も早い速度と遅い速度
対象物の種類	固定	形状：セダン 色：白
ワイパー動作	固定	① 間欠 ② 連続

判定基準

- 縦距離の差異：5% 以下
- 横距離の差異：5% 以下
- 縦相対速度の差異：10% 以下
- 横相対速度の差異：10% 以下
- 幅、高さの差異：5% 以下

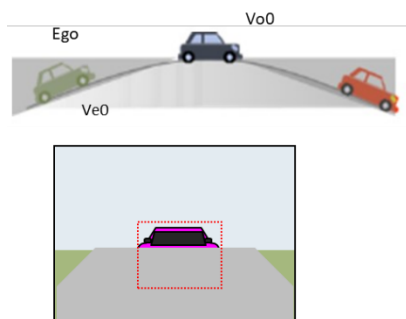


実測 ——— 緑
仮想 ——— 赤

3. 路面形状勾配 死角シナリオ(vertical)

検証方法

- 縦勾配のある路面(凸形状)を走行、自車線前方の認識対象物に一定速で接近する

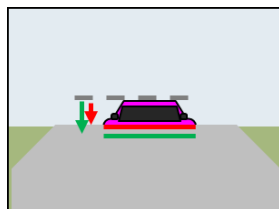


参考：評価シナリオパラメータ

パラメータ項目	変化／固定	範囲
対象物までの距離	変化	認識対象の接地面が見える限界から認識対象の上部が見える限界まで
対象物との相対車速	固定	組合わせる交通流シナリオに従う
対象物の種類	固定	形状：セダン 色：白
道路構造縦勾配	固定	縦断勾配：6%

判定基準

- 画像上、車両トップから遮蔽路面までの高さの差異：画素数 10pix 以下
- 縦距離の差異：5% 以下
- 横距離の差異：5% 以下
- 縦相対速度の差異：10% 以下
- 横相対速度の差異：10% 以下
- 幅、高さの差異：5% 以下



実測 —
仮想 —

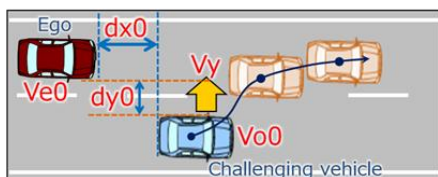
4. 周辺移動物(飛来物)による遮蔽 Cut-in シナリオ

検証方法

- ・ 認識対象物が自車線前方に一定横速度で進入する間に飛来物が自車前方を横切る。飛来物とは交通参加者以外の移動物を想定している。地面に接していても構わないが認識対象物の一部を隠すようにして移動させることが可能なこと。

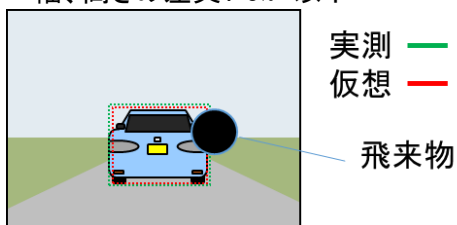
参考: 評価シナリオパラメータ

パラメータ項目	変化/固定	範囲
対象物までの距離	変化	最も遅い速度でのCut-in距離からセンサの最大検知距離まで 横位置dy0: 3.5m
対象物との相対車速	変化	ALKSでのpreventable基準に照らし最も早い速度と遅い速度
対象物の種類	固定	形状: セダン 色: 白
飛来物	変化	大きさ(直径): 300mm (レジ袋大を想定) 横速度: 視界を横切り得る最小速度を設定



判定基準

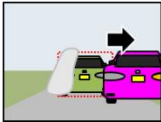
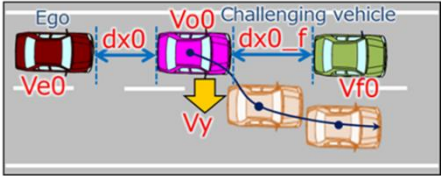
- ・ 縦距離の差異: 5% 以下
- ・ 横距離の差異: 5% 以下
- ・ 縦相対速度の差異: 10% 以下
- ・ 横相対速度の差異: 10% 以下
- ・ 幅、高さの差異: 5% 以下



5. 他車両付着物 Cut-out シナリオ

検証方法

- カバーで覆われた認識対象の後ろを走行する車両がカットアウトする。

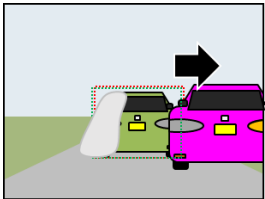


参考：評価シナリオパラメータ

パラメータ項目	変化／固定	範囲
対象物までの距離	変化	最も遅い速度でのCut-out距離からセンサの最大検知距離まで
対象物との相対車速	変化	カットアウトシナリオでのpreventable基準に照らし最も早い速度と遅い速度
対象物の種類	固定	形状：セダン 色：白
カバーで一部遮蔽した認識対象の遮蔽率	変化	認識対象の車両幅に対して遮蔽率 30% ～ 70%

判定基準

- 縦距離の差異：5% 以下
- 横距離の差異：5% 以下
- 縦相対速度の差異：10% 以下
- 横相対速度の差異：10% 以下
- 幅、高さの差異：5% 以下



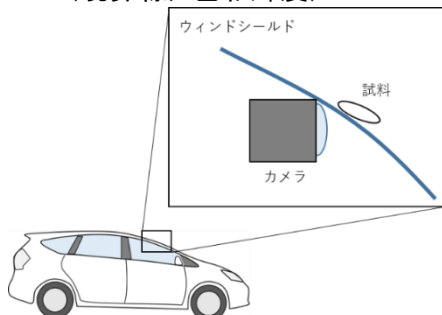
実測 — 緑
仮想 — 赤

■遮蔽 配置検証(境界線)・色彩輝度検証(境界線)

1. センサ前面付着物 知覚部一致性

検証方法

- ・車両静止状態でウインドシールド上に試料を塗布し、信号強さ・色味の評価方法で検証を行う。
(F.2.3.3.11 アセット・シナリオ 認識対象(境界線) 配置、F.2.3.3.12 アセット・シナリオ 認識対象(境界線) 色彩輝度)



判定基準

- ・遮蔽部と非遮蔽部の各々で実機と画素値の差異が $\pm 2\%$ 以下かつ、遮蔽部と非遮蔽部の画像上の距離の差異が $\pm 2[\text{ピクセル}]$ 以内

■遮蔽 認識結果(境界線)

モデル化分類		要因分類		不調内容	特徴抽出		
					遮蔽		
				不調概要	(対象が見えない)		
				要因項目(具体例)	車両側で見れない	対象側で見れない	死角
車両・センサ	センサ前面	① 付着物・障害物	遮蔽 - 泥・埃 等	泥・塵などの付着 (画像欠損)	3	—	—
			遮蔽 - 雪・氷 等	雪・氷などの付着 (画像欠損)	3	—	—
			遮蔽 - 水 等	水などの付着 (画像欠損)	2	—	—
			遮蔽 - 虫・鳥糞 等	虫・鳥糞などの付着 (画像欠損)	2	—	—
			② 遮蔽 - ワイパー	ワイパ動作 (画像欠損)	1	—	—
		③ 区画線	汚れ・掠れ	落ち葉、積雪などによる部分的な隠れ 汚れ、かすれ、引き直し	—	3	—
認識対象	移動物	他車両	色	付着物基準色 (車両の色と類似～相違)	—	1	—
			形状	付着物様々な形 (泥やシールなどの形状、模様)	—	1	—
			範囲	付着範囲 (一部分～車体全体)	—	3	—

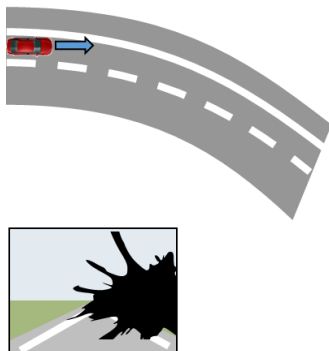
(原理×要因マトリックスより)

上記 3 分類について、各々妥当性検証方法を示す。

1. センサ前面付着物 Lane-keep シナリオ

検証方法

- 付着物により視野が制限されている状況で自車線に沿って一定速度で走行



参考：評価シナリオパラメータ

パラメータ項目	変化／固定	範囲
自車速度	固定	Ve0: 120 kph
車線幅	固定	3.5m
車線曲率	固定	R380
対象物の種類	変化	形状：実線、破線 色：白、黄
付着物(外乱要因)による自車線区画線の遮蔽率	固定	遮蔽率：50%

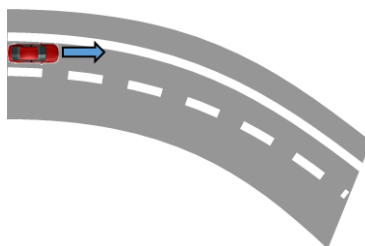
判定基準

- 曲率半径の差異：5% 以下
- 方位の差異：5% 以下
- 位置の差異：5% 以下
- ターゲット種別が一致していること

2. センサ前面障害物 Lane-keep シナリオ

検証方法

- ワイパー動作させながら自車線に沿って一定速度で走行

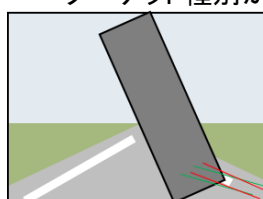


参考：評価シナリオパラメータ

パラメータ項目	変化／固定	範囲
自車速度	固定	Ve0: 120 kph
車線幅	固定	3.5m
車線曲率	固定	R380
対象物の種類	変化	形状：実線、破線 色：白、黄
ワイパー動作	固定	①間欠 ②連続

判定基準

- 曲率半径の差異：5% 以下
- 方位の差異：5% 以下
- 位置の差異：5% 以下
- ターゲット種別が一致していること

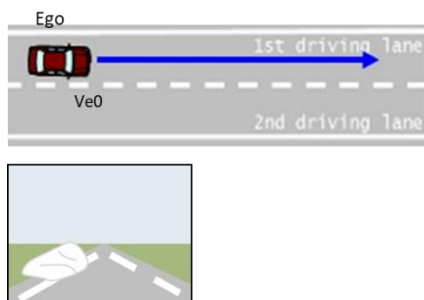


実測 緑
仮想 赤

3. 区画線汚れ Lane-keep シナリオ

検証方法

- 路上の落ち葉、積雪などにより、区画線が一部遮蔽されている状況で自車線に沿って一定速度で走行する。遮蔽率が最大で 50%となるように遮蔽する。

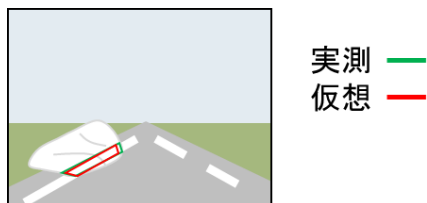


参考：評価シナリオパラメータ

パラメータ項目	変化／固定	範囲
自車速度	固定	Ve0: 120 kph
車線幅	固定	3.5m
車線曲率	固定	R380
対象物の種類	変化	形状：実線、破線 色：白、黄
付着物(外乱要因)による自車線区画線の遮蔽率	固定	遮蔽率：50%

判定基準

- 区画線の遮蔽量の差異：画素数 5% 以下
- 曲率半径の差異：5% 以下
- 方位の差異：5% 以下
- 位置の差異：5% 以下
- ターゲット種別が一致していること



■(空間障害物による)空間周波数低 コントラスト低

検証方法

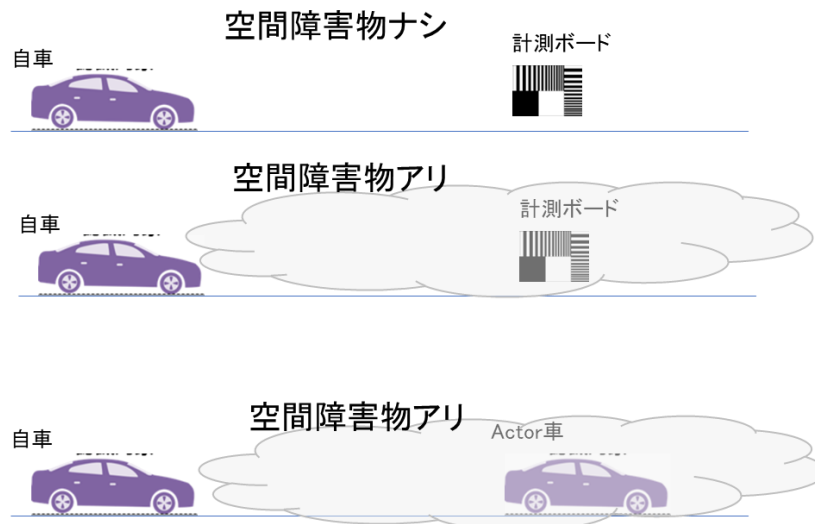
- ・ 評価シナリオでは、外乱要因パラメータを振って性能限界等の状態を作り、検証を行う事を想定
- ・ ツールとしてサポート可能(=実機計測可能)な外乱要因パラメータの組み合わせで外乱再現を確認

(検証1)知覚部観点

専用の計測ボードを配置し、外乱要因パラメータを振って、空間周波数とコントラストを検証する
※確認は輝度に対して線形な RAW データを確認

(検証2)認識部観点

外乱要因パラメータを振って、停止している認識対象に対して自車を接近させていき認識結果を検証する



判定基準

(検証 1)シミュレーションと実機で空間周波数とコントラストが $\pm 5\%$ 乖離で収まること

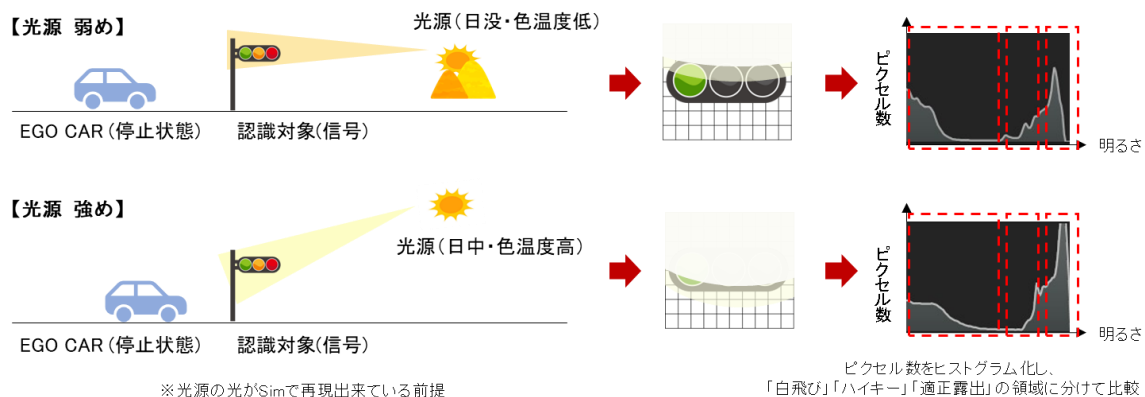
計測条件: 計測値の平均値と理論値の $\pm 5\%$ 乖離で収まること

(検証 2)シミュレーションと実機の車両認識可能距離が $\pm 5\%$ 乖離で収まること

■過多(飽和) ダイナミックレンジ

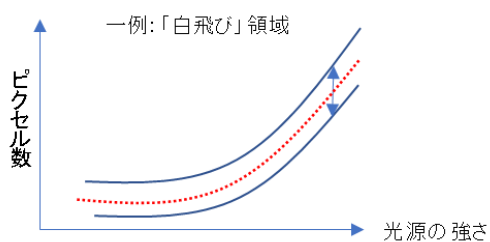
検証方法

- 前方正面にある光源に対して発生する対象物(信号)画角における白飛び等の画像の変化を、ヒストグラムで確認する



判定基準

- それぞれの領域において N 回(例:3 回)検証を行い、ピクセル数の実測との誤差±5%以下に収まることを確認する。可能であれば、複数の光源の強さの場面で検証することが望ましい

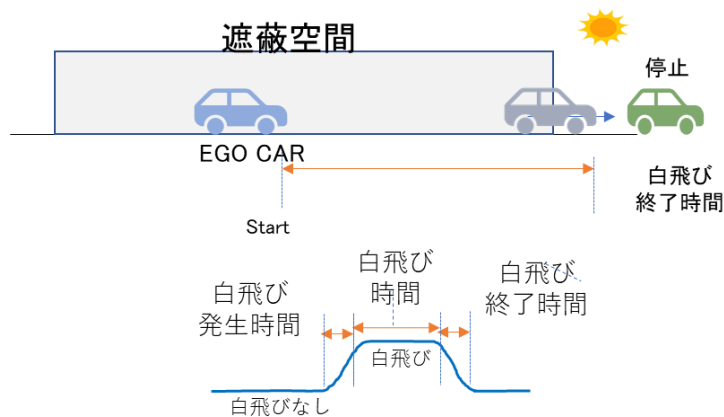


■過多(飽和) 継続時間

検証方法

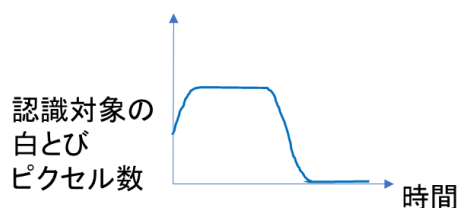
白飛びの定義: 取込み値の最大値の 80%以上、もしくは、認識に影響するもの遮蔽空間にて白飛びが発生(HDR 対応で発生しないときも含む)から終了までの経過で確認する。

- ・ 自車速: 10[km/h]程度もしくは 30[km/h]程度
- ・ ターゲット車 車種: 大型車など 車速: 停車
- ・ 既知道路(遮蔽空間(トンネルなど): 直線)の外にターゲット車両を止め、自車は一定速度で近づく
- ・ 光源の強さ(例: 晴天、薄曇り等)や車速(例: 10[km/h]くらい、30[km/h]位)の組合せ毎に N 回(例: 3 回)検証を行う
- ・ 自車線前方のターゲット車両距離(位置)、相対速度の時系列データおよび実機映像を取得する
- ・ 同シナリオにおいてシミュレーションで映像を作成する
- ・ 出口手前(ターゲット車周辺)の白飛びが発生していない地点から白飛びが終了するまでの時間帯で白飛びピクセル数を測定し、比較する



判定基準

- ・ 経過時間と白飛びピクセル数について、実機との差が ± 5 [ピクセル]以下の範囲

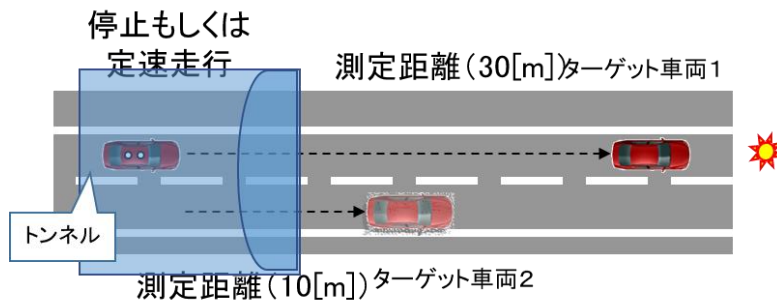


■シナリオ 認識対象(車両) 距離/速度

検証方法

認識結果が実機カメラとシミュレーション映像で同等であることを確認する。

- ・ 不調要因(トンネル、光源)を適正に配置する(実機では現象が発生している)
- ・ 自車速: 停車 もしくは 5[km/h]程度 もしくは 10[km/h]程度
- ・ ターゲット車車速: 停車 もしくは 5[km/h]程度 もしくは 10[km/h]程度
- ・ 既知道路(直線、定常円(例: R100 程度))を走行する
- ・ ターゲット車両 1 は乗用車とする
- ・ ターゲット車両 2 は大型車とする
- ・ ターゲット車両 1 との初期車間距離 10[m]付近もしくは 30[m]付近
- ・ ターゲット車両 2 との初期車間距離 10[m]付近
- ・ ターゲット車両1は停車または車間距離を維持する
- ・ ターゲット車両 2 は車間距離を維持する
- ・ ターゲット車両1は自車線を維持する
- ・ ターゲット車両 2 は初期車線を自車線または隣車線とし、車線を維持もしくは車線変更する
- ・ 自車前方のターゲット車両 1,2 との距離(位置)、相対速度の時系列データを測定し、定常的なオフセットがある場合は、相関値として求め、必要に応じて相殺して、比較する



判定基準

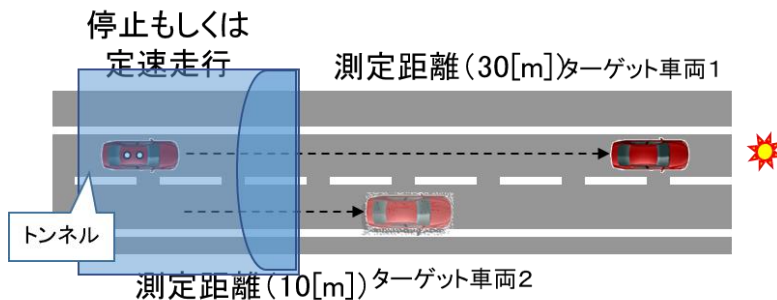
- ・ 距離は、実機との差が $\pm 5\%$ の範囲
- ・ 速度は、実機との差が $\pm 10\%$ の範囲

■シナリオ 認識対象(車両) サイズ/向き

検証方法

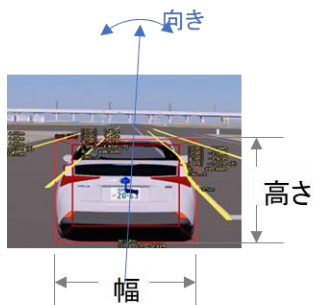
認識結果が実機カメラとシミュレーション映像で同等であることを確認する。

- ・ 不調要因(トンネル、光源)を適正に配置する(実機では現象が発生している)
- ・ 自車速: 停車 もしくは 5[km/h]程度 もしくは 10[km/h]程度
- ・ ターゲット車車速: 停車 もしくは 5[km/h]程度 もしくは 10[km/h]程度
- ・ 既知道路(直線、もしくは定常円(例: R100 程度))を走行する
- ・ ターゲット車両 1 は乗用車とする
- ・ ターゲット車両 2 は大型車とする
- ・ ターゲット車両 1 との初期車間距離 10[m]付近もしくは 30[m]付近
- ・ ターゲット車両 2 との初期車間距離 10[m]付近
- ・ ターゲット車両1は停車または車間距離を維持する
- ・ ターゲット車両 2 は車間距離を維持する
- ・ ターゲット車両1は自車線を維持する
- ・ ターゲット車両 2 は初期車線を自車線または隣車線とし、車線を維持もしくは車線変更する
- ・ 自車線前方のターゲット車両の高さ、幅、向きの時系列データを測定し、定常的なオフセットがある場合は、相関値として求め、必要に応じて相殺して、比較する



判定基準

- ・ サイズは、実機との差が $\pm 5\%$ の範囲
- ・ 向きは、実機との差が $\pm 5\%$ の範囲

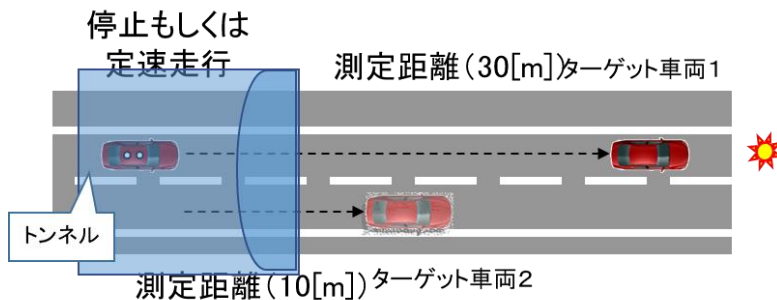


■シナリオ 認識対象(車両) 種別

検証方法

認識結果が実機カメラとシミュレーション映像で同等であることを確認する。

- ・ 不調要因(トンネル、光源)を適正に配置する(実機では現象が発生している)
- ・ 自車速: 停車 もしくは 5[km/h]程度 もしくは 10[km/h]程度
- ・ ターゲット車車速: 停車 もしくは 5[km/h]程度 もしくは 10[km/h]程度
- ・ 既知道路(直線、もしくは定常円(例: R100 程度))を走行する
- ・ ターゲット車両 1 は乗用車とする
- ・ ターゲット車両 2 は大型車とする
- ・ ターゲット車両 1 との初期車間距離 10[m]付近もしくは 30[m]付近
- ・ ターゲット車両 2 との初期車間距離 10[m]付近
- ・ ターゲット車両1は停車または車間距離を維持する
- ・ ターゲット車両 2 は車間距離を維持する
- ・ ターゲット車両1は自車線を維持する
- ・ ターゲット車両 2 は初期車線を自車線または隣車線とし、車線を維持もしくは車線変更する
- ・ 自車線前方のターゲット車両の種別データの時系列データを測定し、比較する
- ・ 種別は、四輪車、歩行者、その他各認識処理で定義される出力種別を対象とする



判定基準

- ・ 種別が一致していること

■シナリオ 認識対象(信号機) 種別

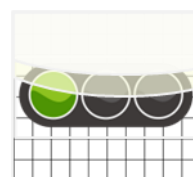
検証方法

認識結果が実機カメラとシミュレーション映像で同等であることを確認する。

- ・ 不調要因(光源)を適正に配置する(実機では現象が発生している)
- ・ 自車速: 停車 もしくは 5[km/h]程度
- ・ 既知道路(直線)にて停車もしくは走行する
- ・ ターゲットは自車線前方の信号機とする
- ・ 自車は自車線を維持する
- ・ 自車線前方の信号機の色種別データの時系列データを測定し、比較する
- ・ 種別は、緑、黄、赤、その他各認識処理で定義される出力種別を対象とする

停止もしくは

定速走行 測定距離(30[m]程度) ターゲット信号機



検証には、自車から見て、ターゲットと光源(太陽)の配置が重なり、ターゲットの一部もしくは全部が白飛びしているシーンを含める

判定基準

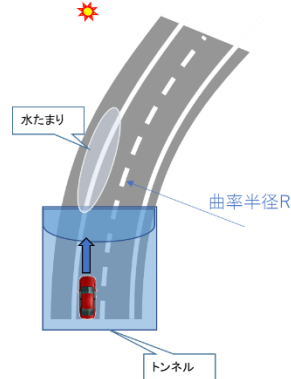
- ・ 種別が一致していること

■シナリオ 認識対象(境界線) 曲率

検証方法

認識結果が実機カメラとシミュレーション映像で同等であることを確認する。

- ・ 不調要因(トンネル、光源、水たまり)を適正に配置する(実機では現象が発生している)
- ・ 自車速: 停車 もしくは 5[km/h]程度 もしくは 10[km/h]程度
- ・ 既知道路(直線、もしくは定常円(例: R100 程度))を走行する
- ・ 走行する定常円区画線(自車から 40[m]程度先までの区間)の曲率半径の時系列データを測定し、定常的なオフセットがある場合は、相関値として求め、必要に応じて相殺して、比較する



判定基準

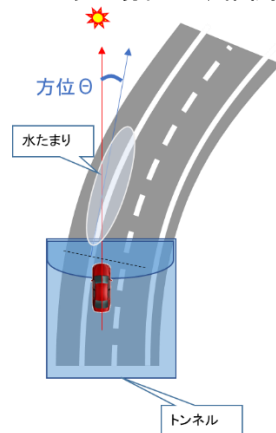
- ・ 曲率は、実機との差が $\pm 15\%$ の範囲

■シナリオ 認識対象(境界線) 方位

検証方法

認識結果が実機カメラとシミュレーション映像で同等であることを確認する。

- ・ 不調要因(トンネル、光源、水たまり)を適正に配置する(実機では現象が発生している)
- ・ 自車速: 停車 もしくは 5[km/h]程度 もしくは 10[km/h]程度
- ・ 既知道路(直線、もしくは定常円(例: R100 程度))を走行する
- ・ 自車を基準に(例: 先端で)走行する区画線の方位の時系列データを測定し、定常的なオフセットがある場合は、相関値として求め、必要に応じて相殺して、比較する



判定基準

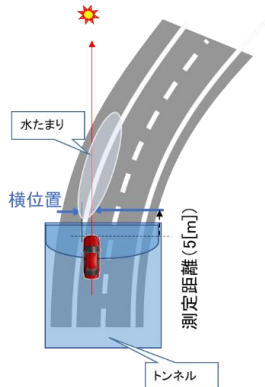
- ・ 方位は、実機との差が $\pm 10\%$ の範囲

■シナリオ 認識対象(境界線) 横位置

検証方法

認識結果が実機カメラとシミュレーション映像で同等であることを確認する

- ・ 不調要因(トンネル、光源、水たまり)を適正に配置する(実機では現象が発生している)
- ・ 自車速: 停車 もしくは 5[km/h]程度 もしくは 10[km/h]程度
- ・ 既知道路(直線、もしくは定常円(例: R100 程度))を走行する
- ・ 自車を基準に(例: 前方 5[m]程度先で)走行する区画線の横位置の時系列データを測定し、定常的なオフセットがある場合は、相関値として求め、必要に応じて相殺して、比較する
- ・ 自車線の左右区画線を対象とする



判定基準

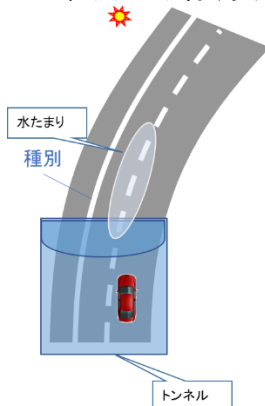
- ・ 横位置は、実機との差が $\pm 5\%$ の範囲

■シナリオ 認識対象(境界線) 種別

検証方法

認識結果が実機カメラとシミュレーション映像で同等であることを確認する。

- ・ 不調要因(トンネル、光源、水たまり)を適正に配置する(実機では現象が発生している)
- ・ 自車速: 停車 もしくは 5[km/h]程度 もしくは 10[km/h]程度
- ・ 既知道路(直線、もしくは定常円(例: R100 程度))を走行する
- ・ 各区画線の種別データの時系列データを測定し、比較する
- ・ 種別は破線、実線、色、その他各認識処理で定義される出力種別を対象とする



判定基準

- ・ 種別が一致していること

Annex G 協定規則第 157 号に係るシミュレーションツールの妥当性確認およびシミュレーション試験方法

G.1 目的、対象範囲

協定規則第 157 号に定められた交通外乱シナリオ (ALKS レーンキープ) の認証試験時のシミュレーションツールの妥当性確認方法とシミュレーション試験方法に関する考え方をまとめる。また、認識部は不調を考慮せず 100% 認識しているものとし、評価対象はメインの AD 制御部 (行動計画) 及び車両運動制御部 (図 G-1) である。

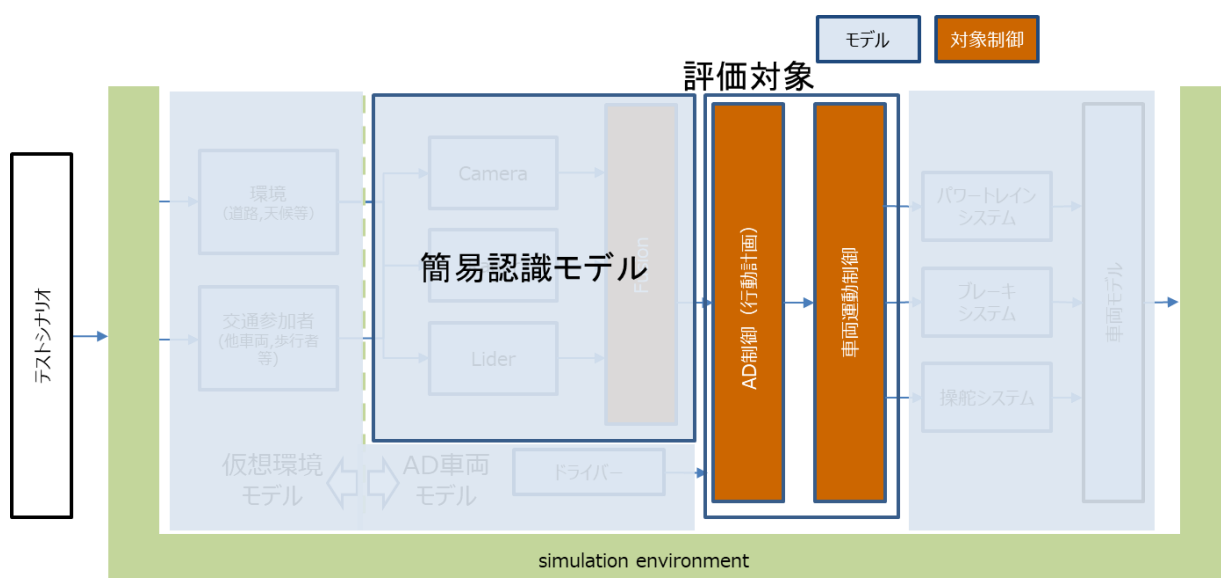


図 G-1 交通外乱シナリオにおける評価対象の制御部

G.2 用語定義

本章に用いられる用語を定義する。

(ア) ADS (Automated Driving System)

運転状況の自動認識、意思決定、操縦制御により、ダイナミック・ドライビング・タスク (DDT) の一部または全部を実行し、人間が必要とする運転の一部または全部を代行する機能を持つシステム

(イ) パラメータ

データ計測やシミュレーションの実行に使用する物理量 (例: 車速、距離など)

(ウ) 算出値

シミュレーションツールの計算結果により求められる値

(エ) 提供値

シナリオから与えられる値

(オ) シナリオ

特定のダイナミック・ドライビング・タスクを実行する過程で、ADS (複数可) / 対象車両 (複数可) と統合されたシーン、およびその相互作用の逐次的な記述

本章では、実車試験およびシミュレーションを実行する際の評価条件となる、自車と他車の初期条件（車速、車間距離など）および他車の挙動（Cut-in など）、道路条件（車線数、幅員など）で構成された記述である

（力） Preventable 境界

UNR-157 Appendix 3 Guidance on Traffic disturbance critical scenarios for ALKS 5. Reference にあるグラフで示される、no collision と no collision 以外（collision など）との境界

G.3 シミュレーションツールの妥当性確認方法

G.3.1 本章の目的

シミュレーション試験を行う前に、シミュレーションに用いるツールが実車試験を適切に代替できることを確認しなければならない。本章ではこの方法およびその基準について述べる。

G.3.2 妥当性確認手法と判定基準

シミュレーションツールの妥当性確認手法と判定基準およびその根拠となる考え方を示す。

妥当性確認手法

選定したシナリオにおいてシミュレーションツールに実車試験と同等の環境情報を与え、他車との相対距離（以降車間距離と呼ぶ）を比較する。

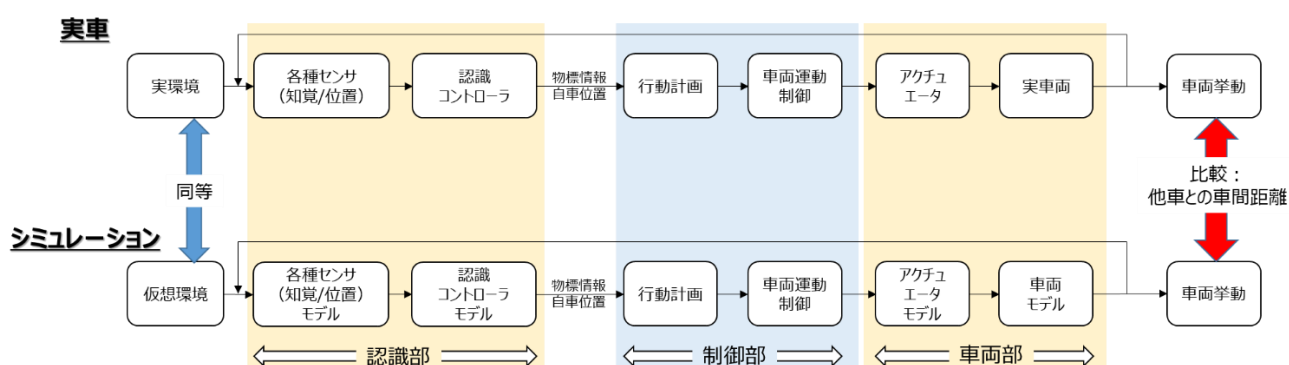


図 G-2 ADS 構成図

根拠となる考え方：

本認証試験では自車と他車の衝突・非衝突の判定を行う。このためシミュレーションツールには衝突・非衝突の判定を行う物理量である車間距離が適切に模擬できていることが求められる。また実車とシミュレーションの結果を適切に比較するためには両者の入力となる先行車位置などの環境情報が同等である必要がある。これらのことから上記妥当性確認手法を用いることにより本用途におけるシミュレーションツールの妥当性を示すことができる。

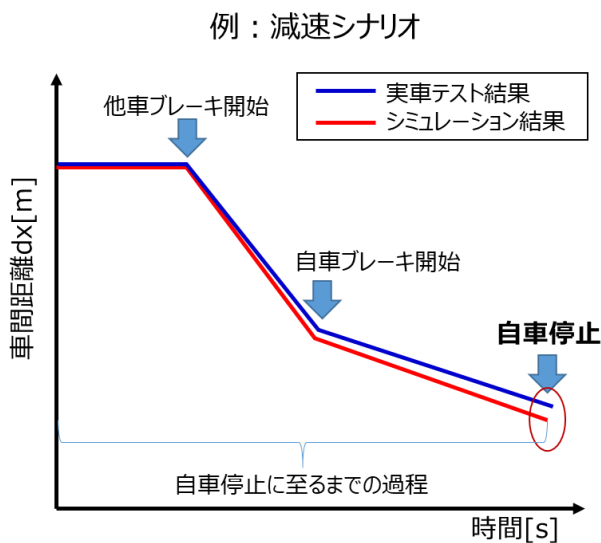
判定基準

自車停止もしくは定常状態※¹に至った時点においてシミュレーションツール結果に対して実車試験結果の方が衝突回避対象となる車両との車間距離※²が長いこと。ここで、比較するのは非衝突(Preventable)領域で示し、また自車停止もしくは定常状態に至るまでの過程は参考とする。

なお、上記判定基準を満足していることを示すためには前提としてシミュレーションツールが「0 シミュレーションツール要求」を満たしていることが求められる。

※1 “定常状態”とは、自車の回避行動結果により対象車との速度差がなくなった状態を指す

※2 車間距離は自車の先端と対象車の後端が作る距離垂線のなす長さを指す



根拠となる考え方：

認証試験の目的である、「ADS による衝突・非衝突のテスト結果がクライテリアの衝突・非衝突の結果に対し、ADS によるテスト結果の方が全て良い結果であることを確認する」ために、その差のあり方として実車試験結果の方が常に高性能と判断できるシミュレーション試験結果であれば、シミュレーションツールで算出した結果においてクライテリアより全て良い結果であることを示すことで、当該テストシナリオにおける実車の回避性能の可否を示すことができる。

G.3.3 シミュレーションツール要求

妥当性確認を行う上でシミュレーションツールに求められる要求は以下の2つである。

要求1：衝突・非衝突の判定結果に寄与するパラメータを計算し出力できること

(シナリオにおける寄与するパラメータは、別添1：各シナリオにおける寄与するパラメータ参照)

要求2：計算結果の比較が可能となるために、計算により出力されたパラメータと実車試験で計測されたパラメータとの間に相関※¹があること

※1 “相関がある”とは、計算結果のパラメータの値が完全に一致することではなく、パラメータ値の変化が同様に振る舞うことを指す。

G.4 シミュレーションツールの妥当性確認手順

G.4.1 本章の目的

本章では、前章にて示した手法を用いてシミュレーションツールの妥当性を確認するまでの手順を示す。

G.4.2 シミュレーションツールの妥当性確認手順

① 妥当性確認用シナリオとパラメータ選定

認証で求められるシナリオ(0 ADS 安全性能評価シミュレーション方法を参照)の中から、妥当性確認を行うシナリオとパラメータを選定する。

INPUT : 「0 ADS 安全性能評価シミュレーション方法」に記載のシナリオとパラメータ範囲

OUTPUT: 妥当性確認を行うシナリオとパラメータ選定結果

NOTE: 低速 ALKS レーンキープにおいては、ADS による回避行動は減速のみ(操舵回避は行わない)のため、実車試験とシミュレーション試験において ADS の減速性能の相関を示すことができるシナリオのパラメータを選定すればよい。比較する減速性能は、ADS の最大減速 G を含む範囲で実施することが望ましい。

② 事前実車試験

妥当性確認を行う前に実車による試験を行い、シミュレーションツールで設定・調整される各種パラメータの計測を行う。

INPUT : シミュレーションツールの結果に影響を与える性能特性の選定結果

OUTPUT: 車両モデル特性調整用の実車テストデータ

③ シミュレーションツールと環境の設定・調整の実施

シミュレーション対象となる車両諸元(ex.車両重量など)と②の事前実車テストで得られたデータにより設定・調整する(ex.ブレーキ性能など)

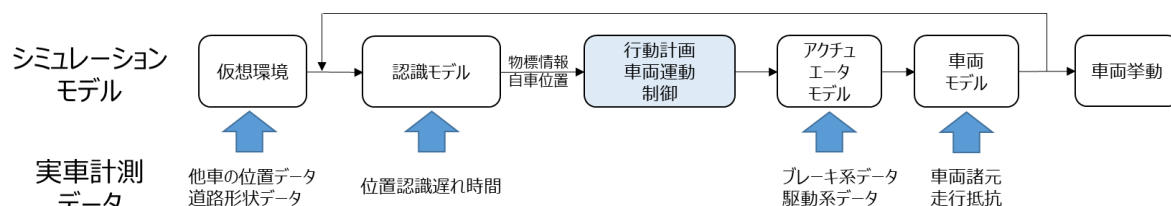
INPUT : 車両モデル特性調整用の実車試験データ

OUTPUT: 設定・調整されたシミュレーションツールと環境

NOTE: シミュレーションツールの調整とは、3章における妥当性確認の判定基準とシミュレーションツール要求を満足させるために、シミュレーションツールの設定・調整前の状態に対して、認識部と車両部のモデルを実車に合わせて調整することである。

設定・調整の実施例

②事前実車試験の計測データから、認識部と車両部のモデルの設定や調整を行う



NOTE: 認識部の応答性を“遅れ時間”で設定する場合、実車の認識部によるターゲット車両の縦/横の位置と速度に対し、実ターゲット車両で計測された位置と速度の増減の時間的なタイミングを一致させて相関(妥当性)を確認する必要がある。

④ 妥当性確認の為の実車試験

上記「①妥当性確認用シナリオの選定」で選定したシナリオにて実車試験を行う。

INPUT : 実車試験を行うテストシナリオとテスト条件となるパラメータ

OUTPUT: テストシナリオ毎の妥当性確認用実車計測データ

⑤ 妥当性確認の為のシミュレーション

上記「①妥当性確認用シナリオの選定」で選定したシナリオにてシミュレーションを行う。

INPUT : テストシナリオ毎の実車試験計測パラメータ、設定・調整されたシミュレーションツールと環境

OUTPUT: テストシナリオ毎の妥当性確認用シミュレーションデータ

NOTE: シミュレーションに入力する他車情報は、④で実施する実車試験において例えば GNSS を利用して測位した各試験車両の位置情報データを基に作成できる。

⑥ シミュレーション環境の妥当性確認

④と⑤の結果を比較してシミュレーション環境の妥当性確認を行う。

INPUT : テストシナリオ毎の妥当性確認用実車計測データ・シミュレーションデータ

OUTPUT: シミュレーション環境の妥当性確認結果

NOTE: ①から⑤まで順番に実施するものではなく、判定基準に合致する様に②から⑤まで繰り返し実施することがある。

G.5 ADS 安全性能評価シミュレーション方法

G.5.1 本章の目的

妥当性が確認されたシミュレーションツールを用いて、認証の合否基準である、「ADS による衝突・非衝突のテスト結果がクライテリアの結果に対し、ADS によるテスト結果の方が全て良い結果であること」を満たしていることを確認するためのシミュレーション試験方法を示す。

G.5.2 試験方法

シミュレーションツールと実施環境(G.6 提出書類-3)で示される環境を用い、以下の2つを組み合わせでシミュレーションに対する入力とする。

1. シナリオと呼ばれる ADS を備えた自車両(以降自車と呼ぶ)と周辺車両(以降他車と呼ぶ)の配置と振舞。

以下が対象シナリオである:

(a) Cut-in シナリオ [No.1]

(b) Cut-out シナリオ [No.2]

(c) 減速シナリオ [No.4]

※[]内の番号は、「別添2: Hazardous scenarios」 図中の番号を指す

2. シナリオにおける自車、他車の持つパラメータ

- ① 自車、他車の速度
- ② 自車、他車の加速度、減速度
- ③ 自車と他車の車間距離

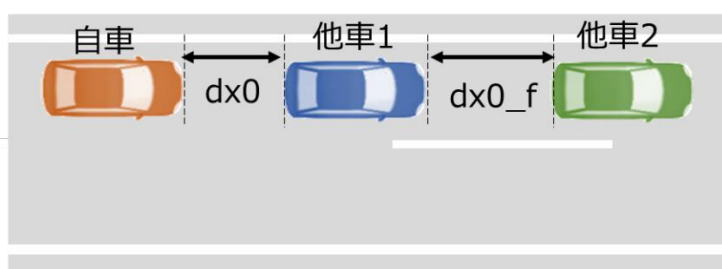
上で使用するシナリオとシナリオにおける自車、他車の持つパラメータを以下に定義する。

G.5.3 自車、他車の持つパラメータの定義

- ① 初期車間距離($dx0$)の基本定義

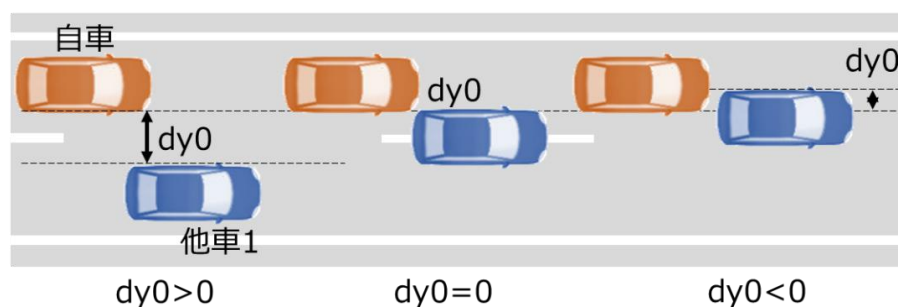
初期車間距離は2つの車両のそれぞれの前端部と後端部が作る距離垂線のなす長さのことである。

自車と自車の前にいる他車1との車間距離を $dx0(m)$ 、他車1とその前にいる他車2との車間距離を $dx0_f(m)$ とする。



- ② 初期横車間距離($dy0$)の基本定義

横車間距離は2つの車両の隣り合う側面部の側端線間の長さのことである。符号は自車から見たときに他車1との重なりが無い場合は正とし、重なりがある場合は負とする。よってこの距離が0となる場合は両距離垂線が重なる場合である。



- ③ 初期速度の基本定義

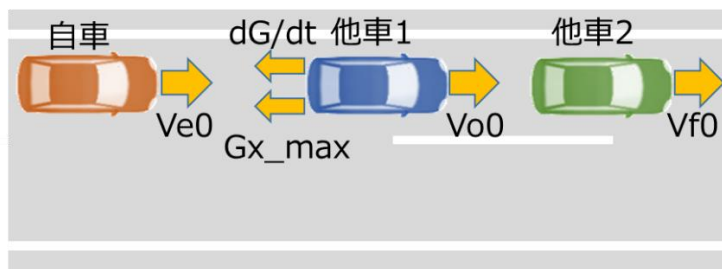
$Ve0(km/h)$: 自車の初期速度

$Vo0(km/h)$: 同一車線または隣接車線の先行他車1の初期速度

$Vf0(km/h)$: 他車2の初期速度

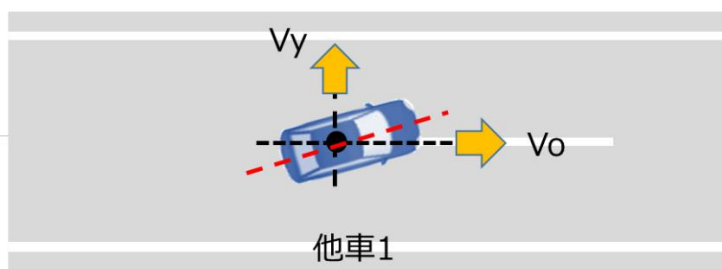
$Gx_max(G)$: 他車1の減速度

dG/dt : 他車1の減速度の変化率



④ 横速度の基本定義

V_y (m/s): 他車1の横速度で車線に対し垂直方向の速度

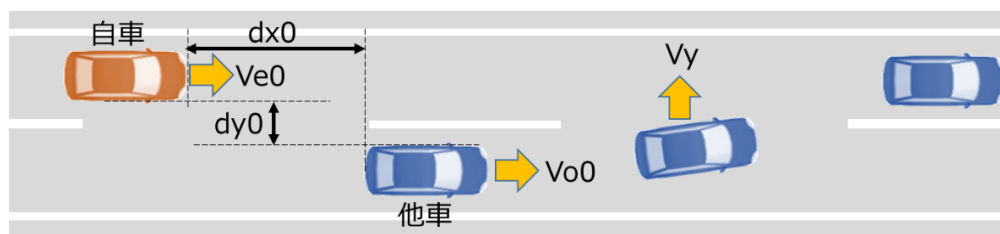


※詳細は、別添3:他車挙動の定義を参照

G.5.4 各シナリオの定義

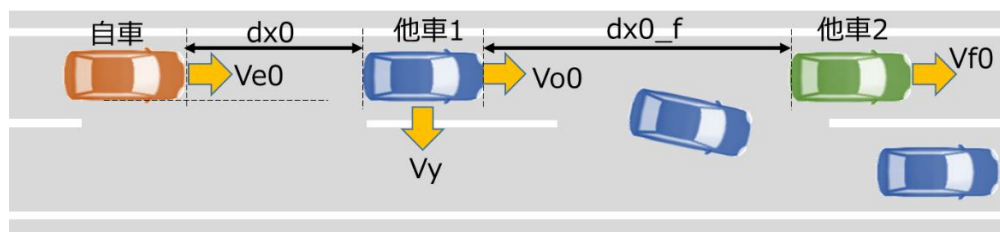
(a) Cut-in シナリオ

G.4.2 で定義した“自車、他車のパラメータ”をこのシナリオでは以下の様に使用する



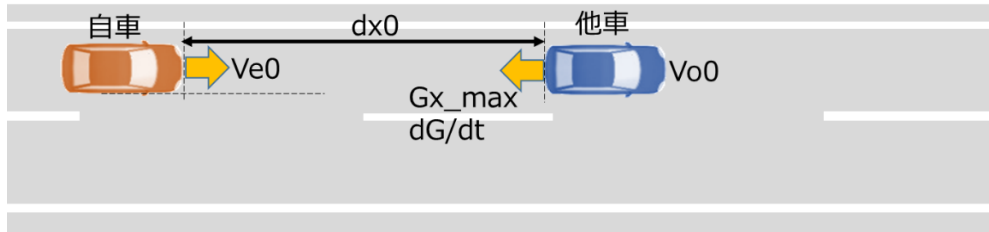
(b) Cut-out シナリオ

G.4.2 で定義した“自車、他車1他車2のパラメータ”をこのシナリオでは以下の様に使用する



(c)減速シナリオ

G.4.2 で定義した“自車、他車のパラメータ”をこのシナリオでは以下の様に使用する



G.5.5 合否基準

UNR-157 Appendix 3 Guidance on Traffic disturbance critical scenarios for ALKS 5. Reference に定められた回避可能な範囲(no collision の領域)において衝突が生じないこと。

G.5.6 シミュレーションにおけるパラメータの範囲

① シナリオに共通のパラメータの値と範囲

(1) 道路パラメータ値

道路パラメータ	値	単位
車線数	2	–
幅員	3.5	m
路面摩擦係数	1.0	μ
横断勾配	0	%
縦勾配	0	%
曲率半径	∞	%

(2) 車両パラメータ値

車両パラメータ	自車	他車1	他車2
車幅	(申請車両による)	1.9m	1.9m
車長	(申請車両による)	5.3m	5.3m
形状	矩形	矩形	矩形
走行位置	車線中央	車線中央	車線中央で停止

② シナリオ固有のパラメータ範囲

パラメータの範囲は、以下の(1)から(3)までに掲げるものを基本としつつ、申請者が設定しようとする走行環境条件等に応じて個別に設定するものとする。

(1) Cut-in シナリオのパラメータ範囲

パラメータ	範囲
Ve0[初期自車速]	$20 \leq Ve0 \leq [60]\text{km/h}$
Ve0-Vo0[相対速度]	$0 \leq Ve0 - Vo0 \leq 40\text{km/h} ※1$
dx0[初期車間距離]	$0 \leq dx0 \leq 60\text{m}$
dy0[初期横車間距離]	$\{(3.5 - \text{自車車幅})/2 + 0.8(\text{他車側})\}\text{m}$
Vy[横速度]	$0 < Vy \leq 3.0\text{m/s}$

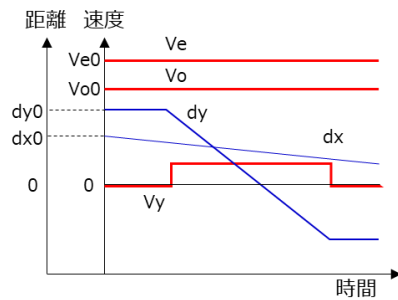
[]自車の設計最高速値

※1 Cut-in 車両速度が自車速度より高いシナリオを除く。

Note: Cut-in 車両の速度が遅い場合において、物理的に発生しえないような横速度の条件は除く。(例えば、車速 10km/h(2.78m/s)、横速度 3m/s のような組み合わせ等)

Note: 申請する自動運転の作動範囲が前走車追従時に限られる場合は、Cut-in 車両の横速度と車間距離の組み合わせで先行車の前に Cut-in する場合もしくは先行車に衝突する条件は除く。

例: Cut-in パラメータの時間的変化



※時系列中のパラメータは別添 1(a)参照

(2) Cut-out シナリオのパラメータ範囲

パラメータ	範囲
Ve0[初期自車速]	$10 \leq Ve0 \leq [60] \text{ km/h}$
Vo0[先行車速]	$10 \leq Vo0 \leq [60] \text{ km/h} \times 2$
Vf0[初期他車速]	0km/h
dx0_f[初期車間距離]	$0 < dx0_f \leq 100\text{m}$
Vy[横速度]	$0 < Vy \leq 3.0\text{m/s}$

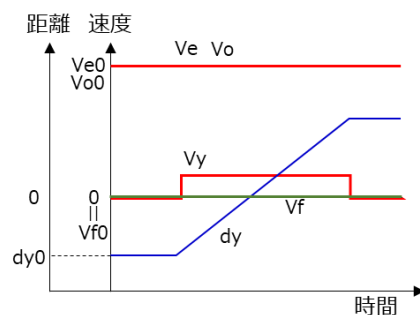
[] 自車の設計最高速値

※2 先行車速度 = 自車速度

Note: Cut-out 車両の速度が遅い場合において、物理的に発生しえないような横速度の条件は除く。(例えば、車速 10km/h(2.78m/s)、横速度 3m/s のような組み合わせ等)

Note: Cut-out 車両が停止車両に衝突する車間距離は条件から除く。

例: Cut-out パラメータの時間的変化



※時系列中のパラメータは別添 1(b)参照

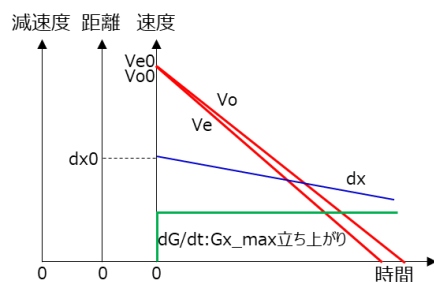
(3) 減速シナリオのパラメータ範囲

パラメータ	範囲
Ve0[初期自車速]	$10 \leq Ve0 \leq [60] \text{ km/h}$
Vo0[先行車速]	$10 \leq Vo0 \leq [60] \text{ km/h} \times 3$
Gx_max[先行車減速度]	$0 < Gx_max \leq 1.0G$
dG/dt[他車減速度変化率]	無限大

[] 自車の設計最高速値

※3 先行車速度 = 自車速度

例：減速パラメータの時間的変化



※時系列中のパラメータは別添 1(c)参照

G.5.7 シミュレーションの実施

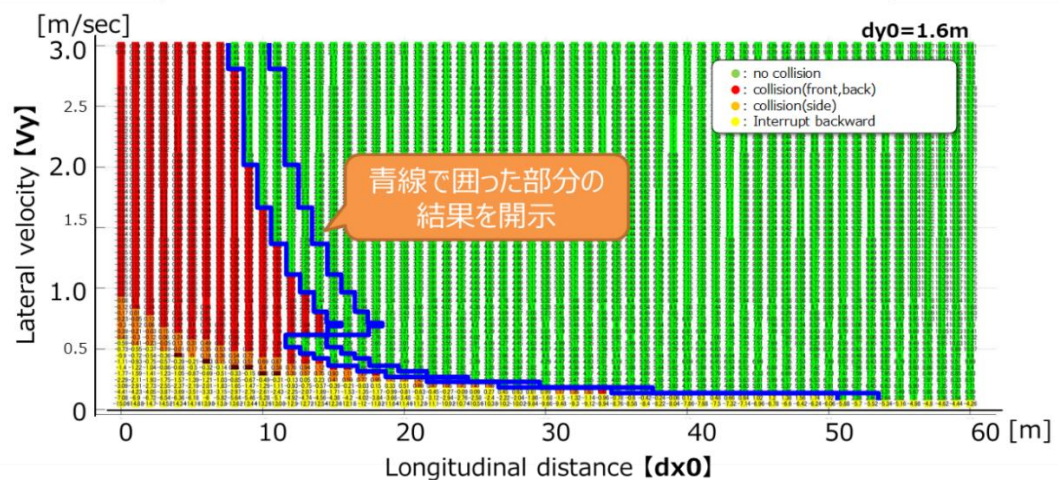
シミュレーションを下記領域に分けて実施する。

(1) Preventable/Unpreventable

境界線近傍の衝突／回避について、より広範囲に確認するため、Cut-in／Cut-out シナリオについて、合否基準の境界線上から車間距離が広がる側において、境界線上加え+1m、+2m ラインで実施する。

NOTE:横速度は最小刻み幅 0.1m/s 間隔

Cut-in の例 : 自車速【Ve0】:30km/h, 他車速【Vo0】:10km/h



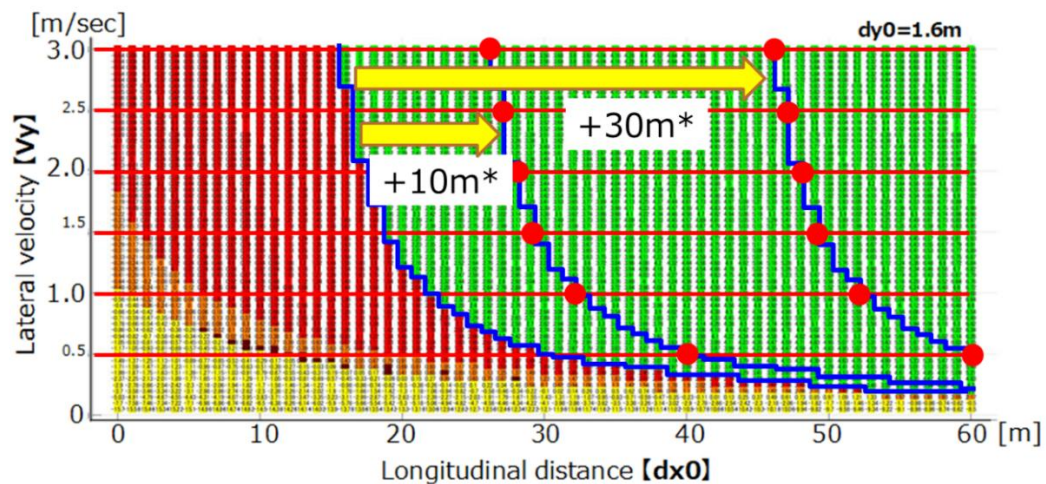
(2) 非衝突領域

網羅性のため境界付近以外の Preventable 領域でも衝突しないことを抜き取りで確認するため、Cut-in / Cut-out シナリオにおいて、合否基準の Unpreventable / Preventable 境界線上から遠くなるにつれ間隔を広げ境界線より+10m、+30m の地点で実施する。ここで、「+10m」「+30m」とした理由は、限られた点数で Preventable 領域の中央付近だけでなく車間距離が遠い地点も確認するためである。

尚、自車速と相対速の組み合わせは ODD 範囲内の全パターンで実施する。

NOTE:横速度は 0.5m/s 間隔、間隔が取れない場合は、取れる範囲内で実施すること。

Cut-in の例 : 自車速【Ve0】:60km/h, 他車速【Vo0】:30km/h



(3) 衝突領域

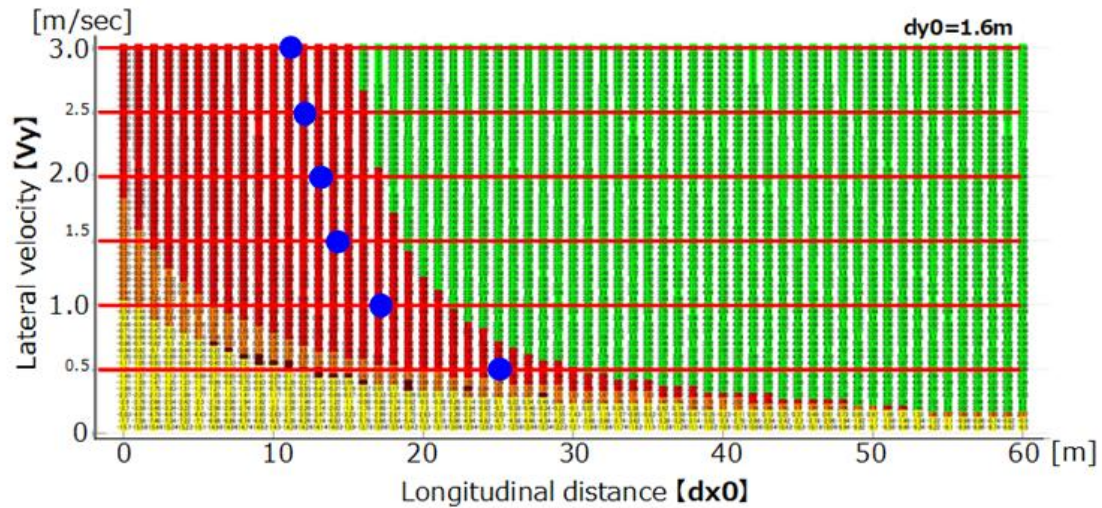
Unpreventable の領域において、Best Effort であること(=衝突回避のための制御を止めないこと)を確認(Cut-in のみ)する。車間距離は Unpreventable 領域内の任意の点を各社で選定する。

尚、自車速と相対速の組み合わせは ODD 範囲内の全パターンで実施する。

NOTE:横速度は 0.5m/s 間隔。回避できて良い。

Cut-in の例 : 自車速【Ve0】:60km/h,他車速【Vo0】:30km/h

この例では、Preventable/Unpreventable 境界線から離れすぎると側突になる可能性と減速する前に衝突する可能性が高まるため標準的な乗用車の車両全長である 5m を参考値として境界線上から一律に 5m 短い車間距離を選定している。



G.6 提出書類

認証時において提出する書類は以下の通りである。

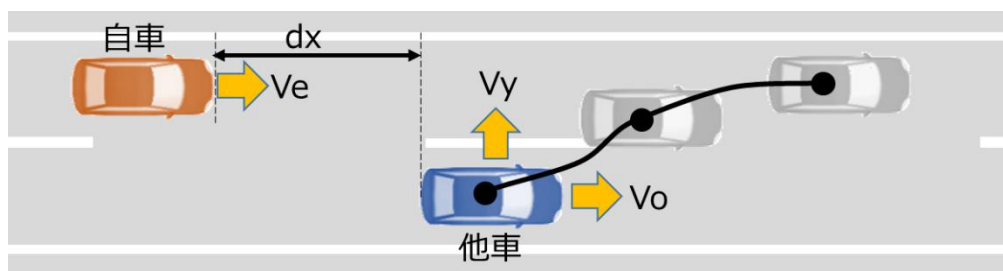
1. シミュレーションツールの妥当性確認試験結果(0 章)
2. ADS の安全性評価に関するシミュレーション試験結果及び判定結果(0 章)
3. シミュレーションツールと実施環境
ハードウェアとソフトウェア構成及びシミュレーション試験ツールとモデルの構成

NOTE: 試験自動車の詳細情報は、TRIAS 48-J122-01、TRIAS 48-R157-01 の付表 1 の『1. 試験自動車および試験条件』に示す。

別添1:各シナリオにおける寄与するパラメータ

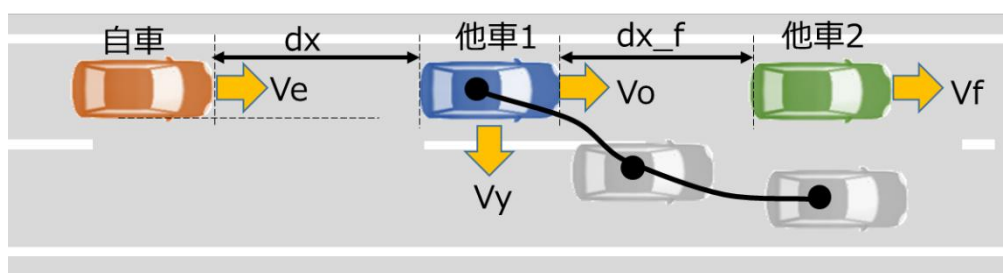
(a) Cut-in シナリオ

パラメータ	属性
自車の速度[V_e]	算出値
自車と他車の縦方向の車間距離[dx]	算出値
他車の横速度[V_y]	提供値
他車の速度[V_o]	提供値



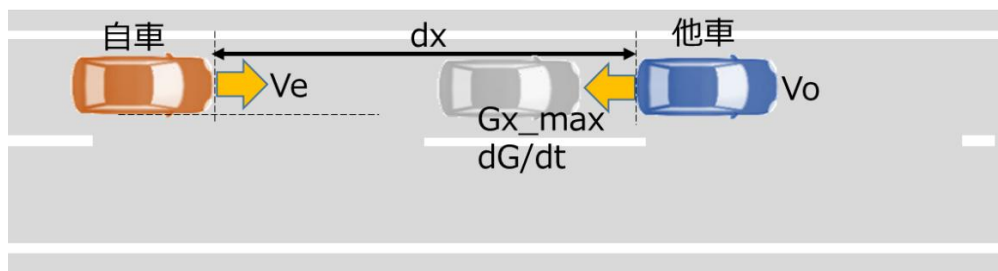
(b) Cut-out シナリオ

パラメータ	属性
自車と他車1の縦方向の車間距離[dx]	算出値
他車1と他車2の縦方向の車間距離[dx_f]	算出値
自車の速度[V_e]	算出値
他車1の横速度[V_y]	提供値
他車1の速度[V_o]	提供値



(c) 減速シナリオ

パラメータ	属性
自車と他車の縦方向の車間距離[dx]	算出値
自車の速度[V_e]	算出値
他車の減速度[G_{x_max}]	提供値
他車の速度[V_o]	提供値



これらを計算し、出力するために必要となるシミュレーションの構成要素を備えたツールでなければならない

別添2: Hazardous scenarios

			Surrounding Traffic Participants' Position and Behavior			
			Cut in	Cut out	Acceleration	Deceleration (Stop)
Road Geometry and Ego-vehicle behavior	Main roadway	Lane keep	 No.1	 No.2	 No.3	 No.4
		Lane change	 No.5	 No.6	 No.7	 No.8
	Merge	Lane keep	 No.9	 No.10	 No.11	 No.12
		Lane change	 No.13	 No.14	 No.15	 No.16
	Branch	Lane keep	 No.17	 No.18	 No.19	 No.20
		Lane change	 No.21	 No.22	 No.23	 No.24

別添3: 他車挙動の定義

本評価は自車を阻害する他車の挙動に対する対処性能を ADS と衝突・非衝突のクライテリアで比較することが目的であるため、他車の挙動の与え方は同一条件にしなければならない。UN-R157 Appendix3 5.Reference に記載のグラフと合わせるために、他車モデル及び挙動を下記に定義する。

- ・ 他車は質点モデルとする
- ・ Cut-in および Cut-out 時の横速度はステップ関数で与える
- ・ Cut-in および Cut-out 中の縦速度は初期速度 (V_{o0}) を保持する
- ・ 減速シナリオにおける減速度はステップ関数で与える (ジャーク $[dG/dt]$ は無限大として与える)
- ・ Cut-in および Cut-out 中の車両向きは、その進行方向 (V_o と V_y とで作る合成ベクトルの向き) を向いているものとする

