



自動運転のシナリオベースの安全性評価 に関する手法と手段の開発状況

北島 創
(一財) 日本自動車研究所
自動走行研究部 自動走行評価研究グループ長



自己紹介

- ・ 北島 創 (きたじま そう)
- ・ 日本自動車研究所 自動走行研究部 主任研究員(上席) 博士(工学)
- ・ 主な経歴
 - 2012年 筑波大学大学院 博士後期課程修了
 - 2015～18 内閣府 SIP-adus 交通事故低減詳細効果見積もりのためのシミュレーション技術の開発及び実証
 - 2016～17 経済産業省 自動運転評価拠点 (Jtown) の整備
 - 2018～ 経済産業省 自動走行システムの安全性評価技術構築に向けた研究開発プロジェクト (SAKURAプロジェクト)
 - 2023～ 筑波大学 リスクレジリエンス研究教育推進コンソーシアム 准教授
- ・ 受賞歴
 - 2016 日本機械学会 第26回交通・物流部門大会優秀講演発表賞
 - 2018 62nd AAAM (Association for the Advancement of Automotive Medicine) Best Poster Award
 - 2019 自動車技術会 第69回自動車技術会賞 技術開発賞
 - 2023 7th FAST-zero'23 (Future Active Safety Technology toward zero traffic accidents) Best Paper Award



研究員情報 ResearchGate



交通流シミュレーション



Jtown 2

(一財) 日本自動車研究所 (JARI) について

JARIの沿革

- ◆ 1961年：(財)自動車高速試験場発足
日本の自動車産業の海外進出にあたり業界共有の高速走行試験用テストコースを建設
- ◆ 1964年：高速周回路完成（つくば市：谷田部テストコース）
- ◆ 1969年：(財)日本自動車研究所(JARI)に改組
中立的・公益的な研究機関として、クルマ社会の健全な進展に貢献することを使命とし、自動車を取りまく様々な社会的課題について、対策技術の**評価技術、評価方法の研究、および評価データを提供**



1957年：国産乗用車の対米輸出開始
1963年：日本初の高速道路開通



排出ガス



電磁両立性



騒音



空力特性

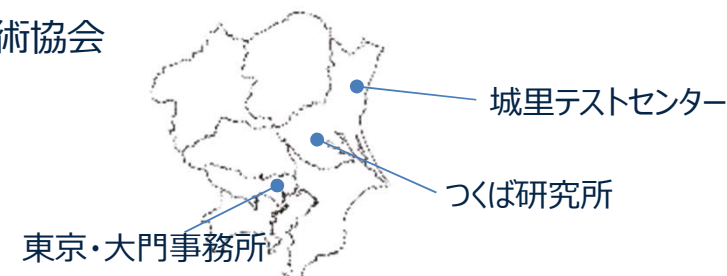


衝突安全性



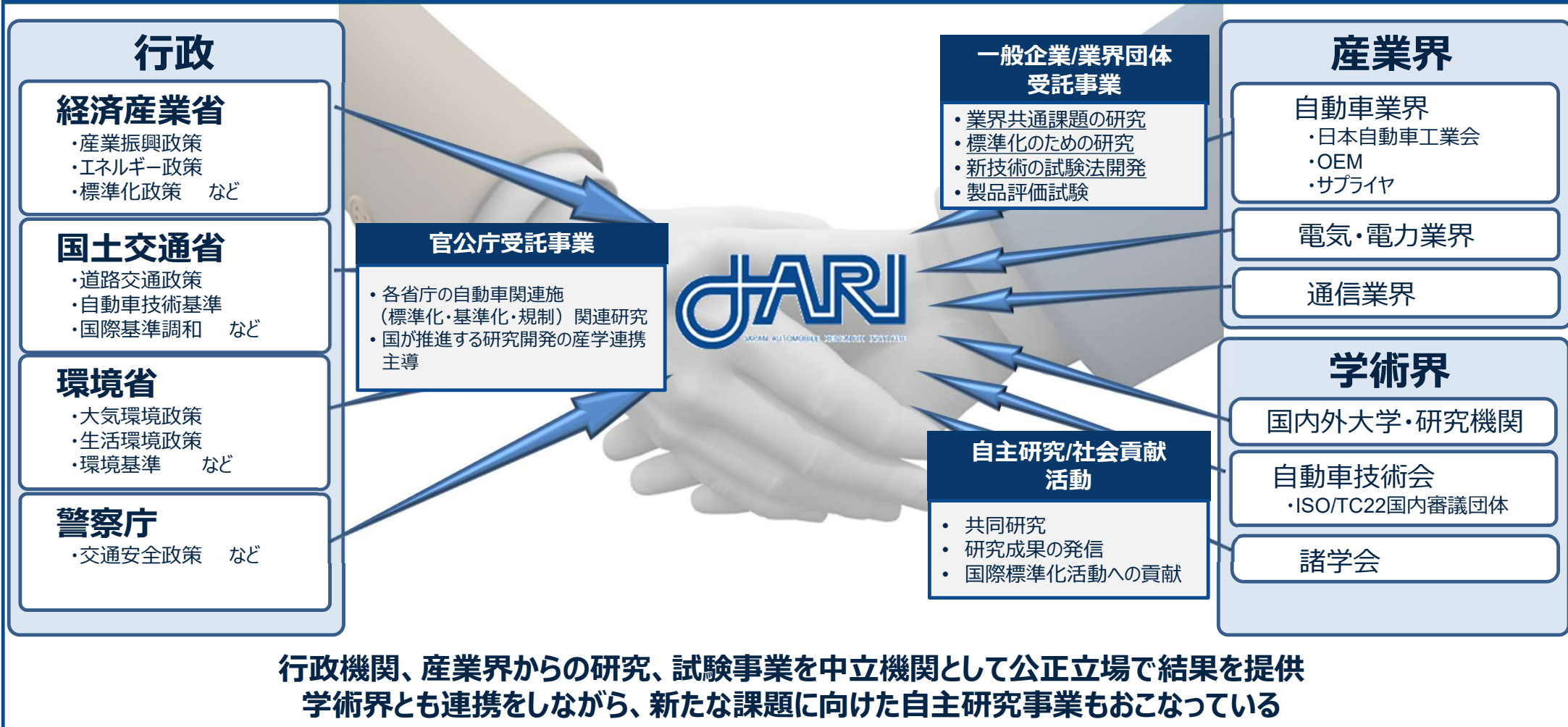
石油代替燃料

- ◆ 2003年：3団体統合（日本自動車研究所、日本電動車両協会、自動車走行電子技術協会）
- ◆ 2005年：城里テストセンター運用開始
- ◆ 2012年：非営利型一般財団法人へ移行
公益的な事業とその他の事業のバランスに基づく経営



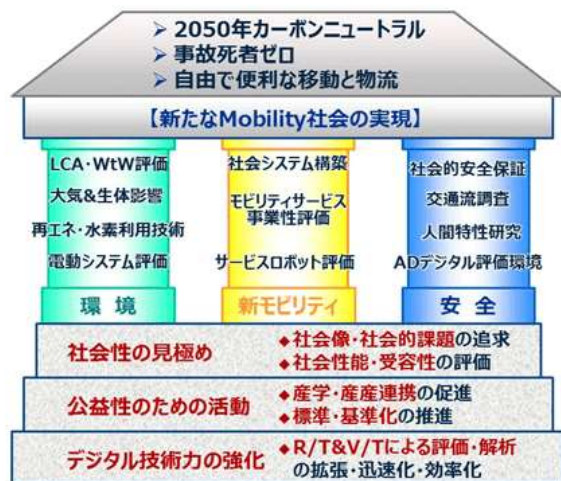
(一財) 日本自動車研究所 (JARI) について

主な関連団体・事業



(一財) 日本自動車研究所 研究事業戦略

日本自動車研究所 (JARI) 研究事業戦略 (2021年)



2021年には、現在、クルマ社会の大きな目標となっている

- ・2050年カーボンニュートラル
- ・交通事故死者ゼロ
- ・自由で便利な移動と物流

に対し、環境、安全、新モビリティの3つの柱から取り組むことを宣言。

これまで培った実車試験の知見みならず、**デジタル技術の強化**がJARIも含め、クルマ社会全体として必要である (MBDへの対応)。

<https://www.jari.or.jp/about/greeting/>



シャーシダイナモ



テストコース (Jtown)

実環境



衝突試験



衝突シミュレーション



車両制動シミュレーション

デジタル環境

目次



- 1 自動運転システムが具備すべき安全性**
- 2 自動運転の安全性評価フレームワーク (Ver.3)**
- 3 安全性評価手法：合理的予見可能性と防止可能性の定義**
- 4 安全性評価手段：シナリオデータベースの開発状況**
- 5 シナリオベースの安全性評価の要件・ポイント**

目次



- 1 自動運転システムが具備すべき安全性**
- 2 自動運転の安全性評価フレームワーク (Ver.3)
- 3 安全性評価手法：合理的予見可能性と防止可能性の定義
- 4 安全性評価手段：シナリオデータベースの開発状況
- 5 シナリオベースの安全性評価の要件・ポイント

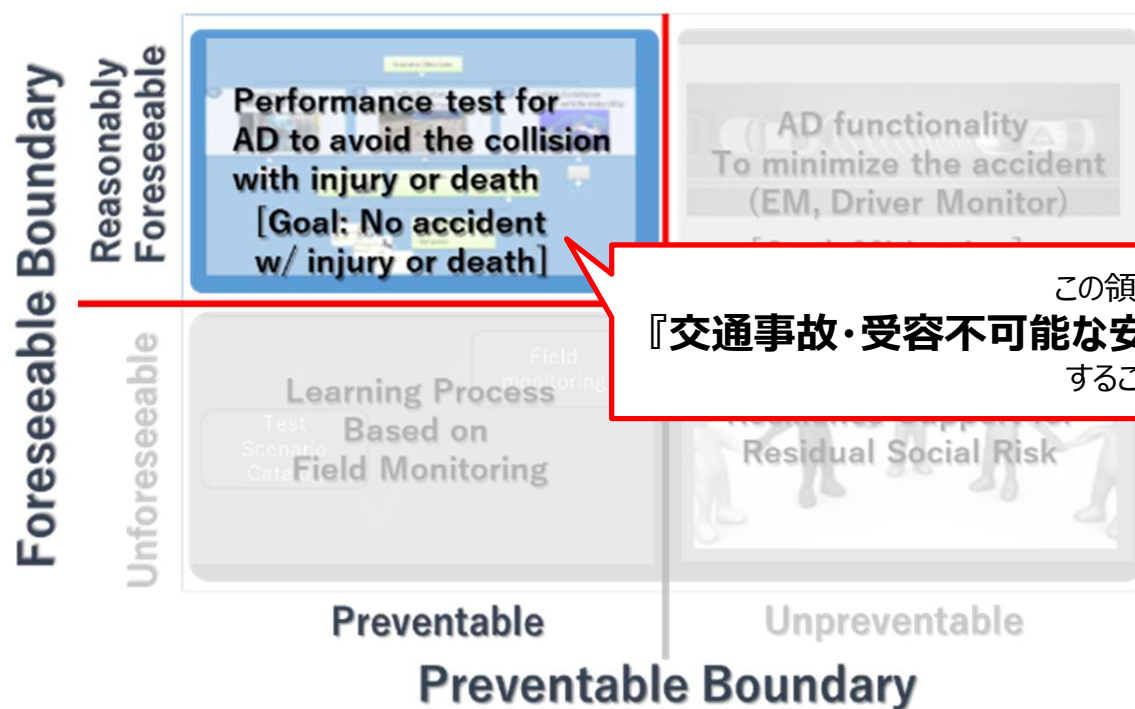
自動運転が具備すべき安全性



自動運転の国際基準調和を行うWP29では、

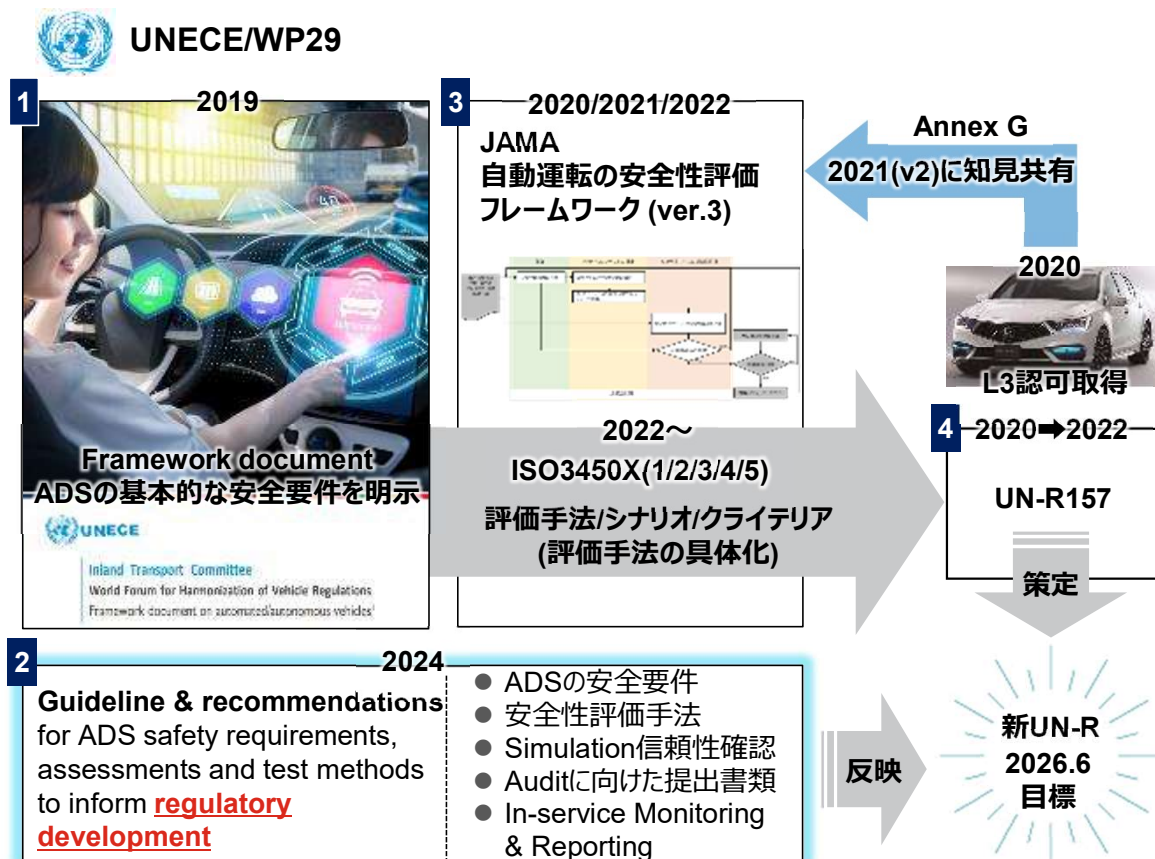
「Automated vehicles shall not cause any non-tolerable risk, meaning that, under their operational domain, *shall not cause any traffic accidents resulting in injury or death that are reasonably foreseeable and preventable*」
(自動運転車両は、その運行設計領域において、合理的に予見可能かつ防止可能な交通事故を発生させてはならない)」

とsafety visionを定義し安全原則を示している



自動運転の安全性要件・評価に係る国際・国内動向

国際動向 (UNECE/WP29ガイドライン)



- 1) UNECE/WP29 (2019)
- 2) UNECE/WP29 (2024)
- 3) 日本自動車工業会 (2020)(2021)(2022)
- 4) UNECE-R157(2020)

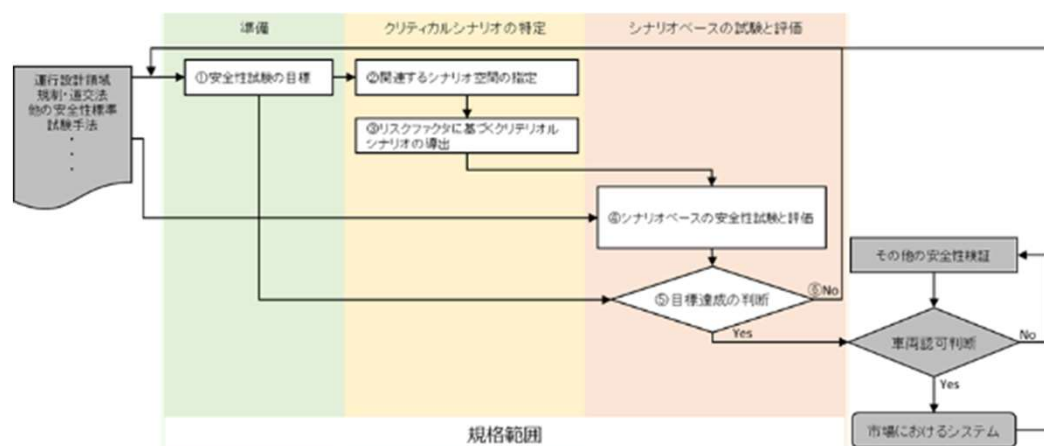
国内動向 (国土交通省ガイドライン)



- 5) 国土交通省/経済産業省/警察庁 (2024)
- 6) 国土交通省 (2024)

自動運転の安全性に関する標準・基準の動向

ISO34502(2022) シナリオに基づく安全性評価フレームワーク



- ①安全目標の設定(例:有能なドライバーより優秀である)
- ②シナリオ検証範囲の設定(例:交通参加者の速度範囲等)
- ③危険な事象に至る要因(例:自車と他車との相対速度や車間距離)
及び②シナリオ検証範囲からクリティカルシナリオの特定
- ④安全性試験・評価を実施
- ⑤①で設定した安全目標を達成しているか判断
- ⑥⑤で未達成の場合、自動運転システムの再検討を要求し、①に戻る(反復)

[経済産業省]

その他ISO3450Xシリーズが順次策定中

UN-R157(2020) 自動運行装置の国際基準(ALKS)

自動運行装置※の国際基準の概要(※高速道路における60km/h以下の車線維持機能) 国土交通省【別紙1】

これまでの状況

- 2019年6月、国連WP29(自動車基準調和世界フォーラム)において、自動運転のフレームワークドキュメント(自動運転車の国際的なガイドラインと基準策定スケジュール等)に合意。
- 日本は、WP29傘下の専門家会議等において共同議長等の役割を担い、官民オールジャパン体制で議論をリード。
- 2020年6月に開催されたWP29本会議において成立。

対象となる自動運転のイメージ



主要要件

- 自動運転システムが作動中、乗車人員及び他の交通の安全を妨げるおそれがないことについて、注意深く有能な運転者と同等以上のレベルであること。
- 運転操作引き継ぎの警報を発した場合において、運転者に引き継がれるまでの間は制御を継続すること。運転者に引き継がれない場合はリスク最小化制御を起動させ、車両を停止すること。
- 運転者が運転操作を引き継げる状態にあることを監視するためのドライバーモニタリングを搭載すること。
- 不正アクセス防止等のためのサイバーセキュリティ確保の方策を講じること。
- 自動運転システムのON/OFFや故障等が生じた時刻を記録する作動状態記録装置を搭載すること。
- 上記の要件について、シミュレーション試験、テストコース試験、公道試験及び書面を組合せて、適合性の確認を行うこと。
(例: 他車の割り込み等が起こりうる状況において、注意深く有能な運転者の反応速度や制動力等のモデルに基づいて回避可能と考えられる衝突を、当該自動運転車が回避できることを確認。)

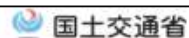
[国土交通省]

26年6月に向けて議論活発化が想定

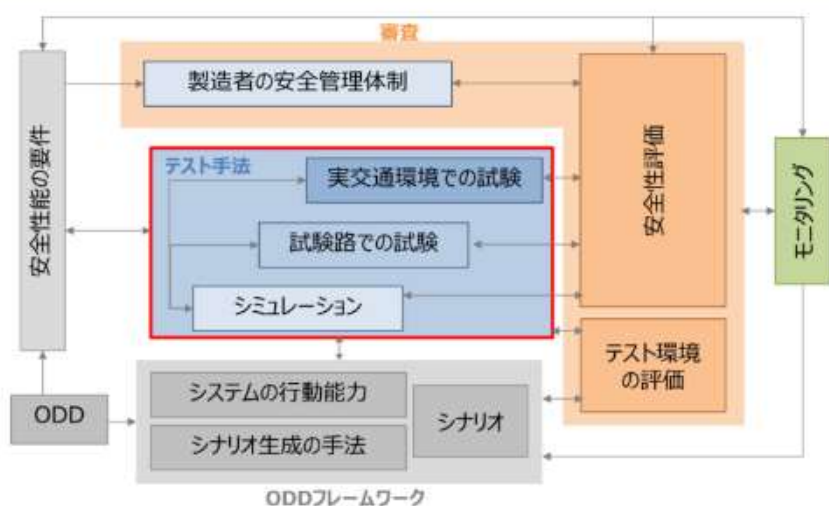
【参考】国交省：自動運転の安全要件の適合性確認



ガイドラインにおける安全性評価の全体像



- ガイドラインにおいては、以下の3つの手法を通じて安全要件への適合性を確認することとしている
- ・審査：製造者の安全管理体制や自動運転車の安全設計、評価シナリオ、評価結果を書面で審査
- ・テスト：シミュレーション、試験路、実交通環境において自動運転車の性能を試験
- ・モニタリング：使用過程にある自動運転車の安全性を継続的に監視し当局へ報告



17

[国土交通省]

実交通環境/試験路/シミュレーションによる評価

ガイドラインにおけるテスト手法の概要



- 自動運転車の安全要件への適合性やシステムの行動能力・ODDに応じた性能を評価するため、シナリオ・テストケースを網羅的に作成
- シミュレーション試験、試験路走行試験、実交通環境試験の3つについて、それぞれの長所及び限界に留意しつつ内容に応じて試験方法を選択して実施



18

[国土交通省]

遭遇し得るシナリオを網羅的に生成して評価

安全性評価を進めるうえでの論点



論点

どのように**評価シナリオを必要十分に限定する**のか？

- ・長距離の耐久走行試験だけでは安全の説明性は確保できない
- ・交通環境に存在する森羅万象すべての評価はできない

目次



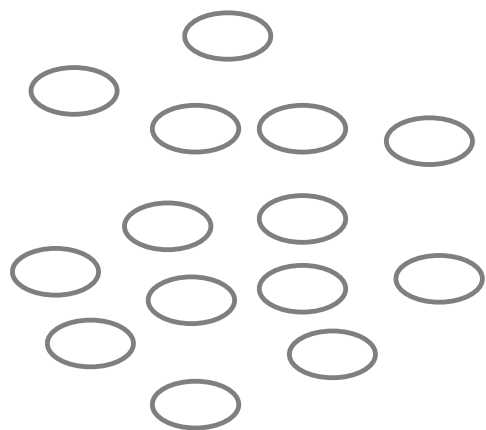
- 1 自動運転システムが具備すべき安全性
- 2 自動運転の安全性評価フレームワーク (Ver.3)**
- 3 安全性評価手法：合理的予見可能性と防止可能性の定義
- 4 安全性評価手段：シナリオデータベースの開発状況
- 5 シナリオベースの安全性評価の要件・ポイント

運転行動の3要素である

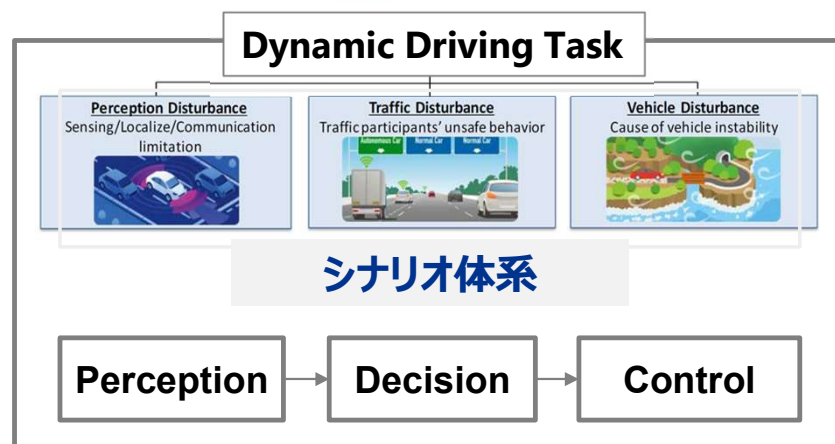
「認識限界（認知）・交通外乱（判断）・車両運動外乱（操作）」でシナリオを体系化

原理原則が異なる3要素毎に安全観点で網羅的なシナリオ体系を構築

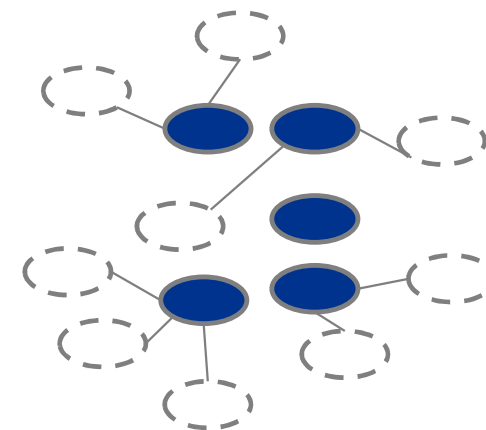
非決定論的システム



交通や自然現象との因果関係が複雑なため、検証範囲は“不特定”である



決定論的システム

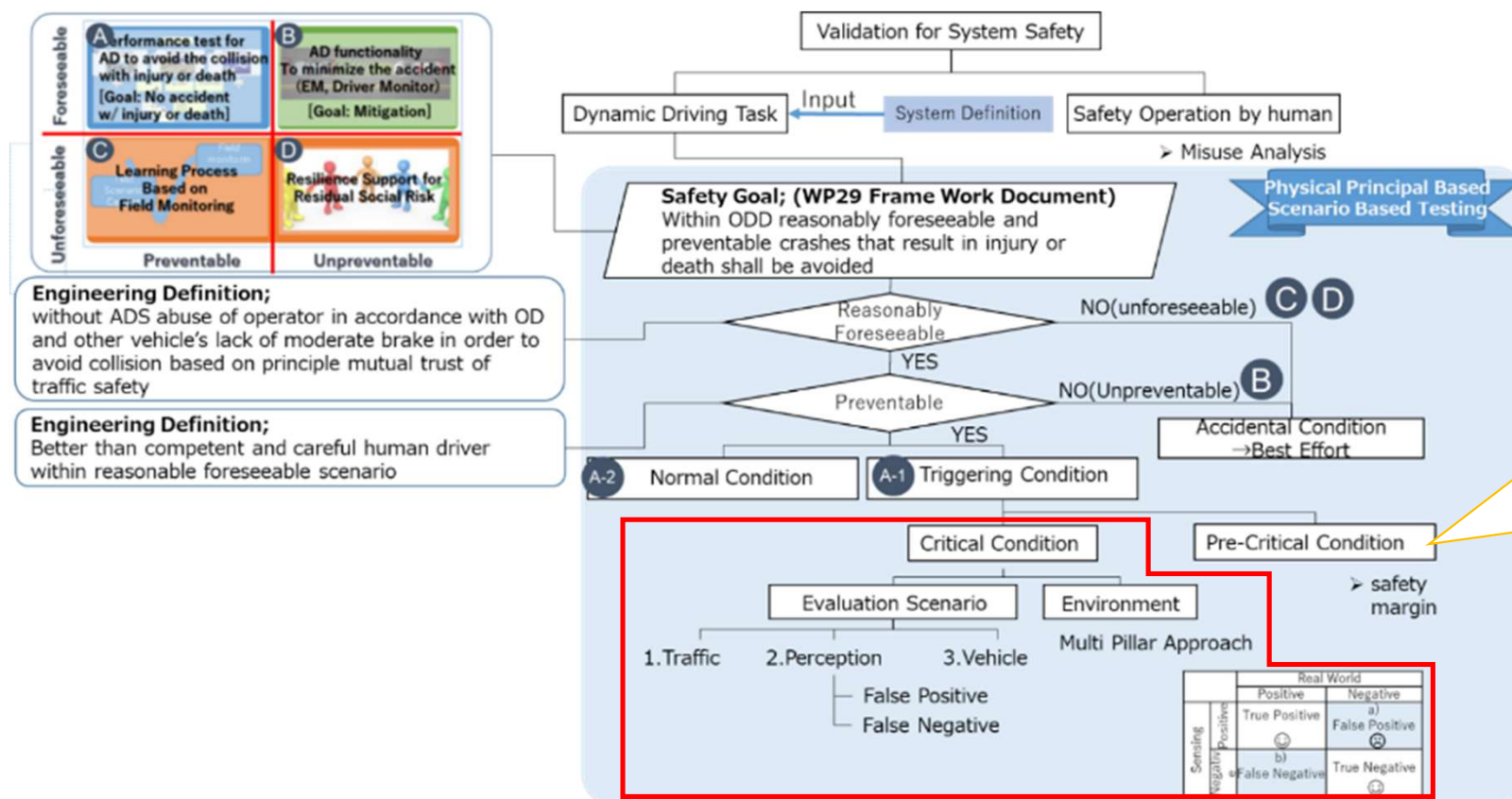


根本原因を特定することで、検証範囲を“特定”できる

安全性評価のスコープ

安全性評価はCritical Conditionがスコープ

動的運転タスクに直ちに影響を与えない潜在的なリスクがある状況（Pre-Critical Condition）はスコープ外（理由）衝突につながる状況に至るか未来が確定していない時点で一律の結果を前提とすべきではない

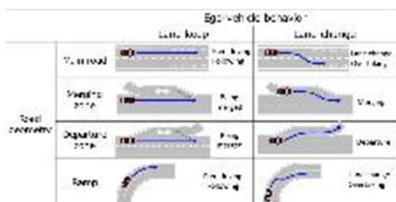


例) 落下物を落としそうな車

原理原則に基づく体系的なシナリオ定義 (1/2)

交通外乱

General vehicle traffic disturbance scenarios



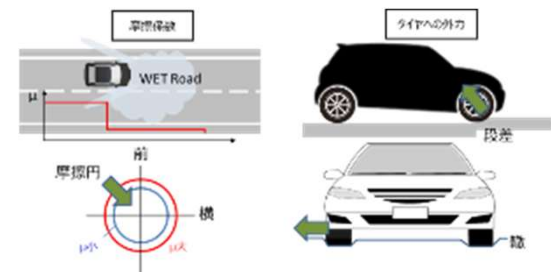
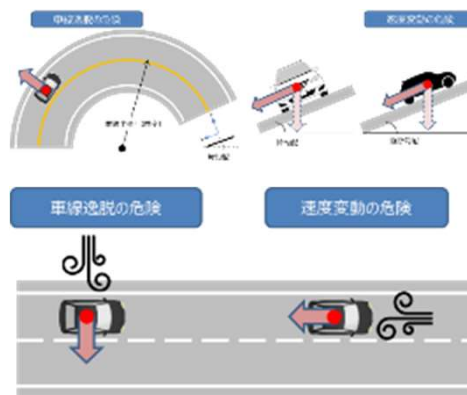
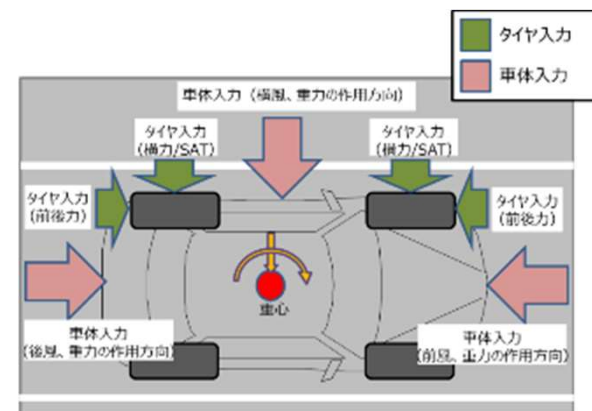
Relative position	Cut in	Cut out	Acceleration	Deceleration (Stop)	Type
1. Front-left	✓				
2. Front	✓				
3. Front-right	✓				
4. Side-left	✓				
5. Side	✓				
6. Side-right	✓				
7. Rear-left		✓			
8. Rear		✓			
9. Rear-right		✓			



Surrounding Traffic Participants' Position and Behavior

Road Geometry	Ego-vehicle behavior	Surrounding Traffic Participants' Position and Behavior			
		Cut in	Cut out	Acceleration	Deceleration (Stop)
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

車両運動外乱



【参考】交通外乱シナリオ：一般道/歩行者に対応

自専道24パターンに道路環境・ふるまいの追加，対歩行者シナリオの定義によって一般道に対応

対四輪車シナリオ(58パターン)

Road sector and subject-vehicle behaviour	Subject-vehicle behaviour	Surrounding traffic participants location and behaviour											
		Going straight				Lane change / Swerving				Turning			
		Same / Crossed from B/L direction		On coming		Same / Crossed from B/L direction		On coming		Same / Crossed from B/L direction		On coming	
non-intersection	Going straight (Lane keep)	N01	N02	N03	N04	N05	N06	N07	N08	N09	N10	N11	N12
	Lane change	N13	N14	N15	N16	N17	N18	N19	N20	N21	N22	N23	N24
Merge zone	Going straight (Lane keep)	N25	N26	N27	N28	N29	N30	N31	N32	N33	N34	N35	N36
	Lane change	N37	N38	N39	N40	N41	N42	N43	N44	N45	N46	N47	N48
Branch zone	Going straight (Lane keep)	N49	N50	N51	N52	N53	N54	N55	N56	N57	N58	N59	N60
	Lane change	N61	N62	N63	N64	N65	N66	N67	N68	N69	N70	N71	N72
Intersection	Going straight (Lane keep)	N73	N74	N75	N76	N77	N78	N79	N80	N81	N82	N83	N84
	Turning	N85	N86	N87	N88	N89	N90	N91	N92	N93	N94	N95	N96

- : 自専道と共通の24パターン
- : 一般道に追加した34パターン

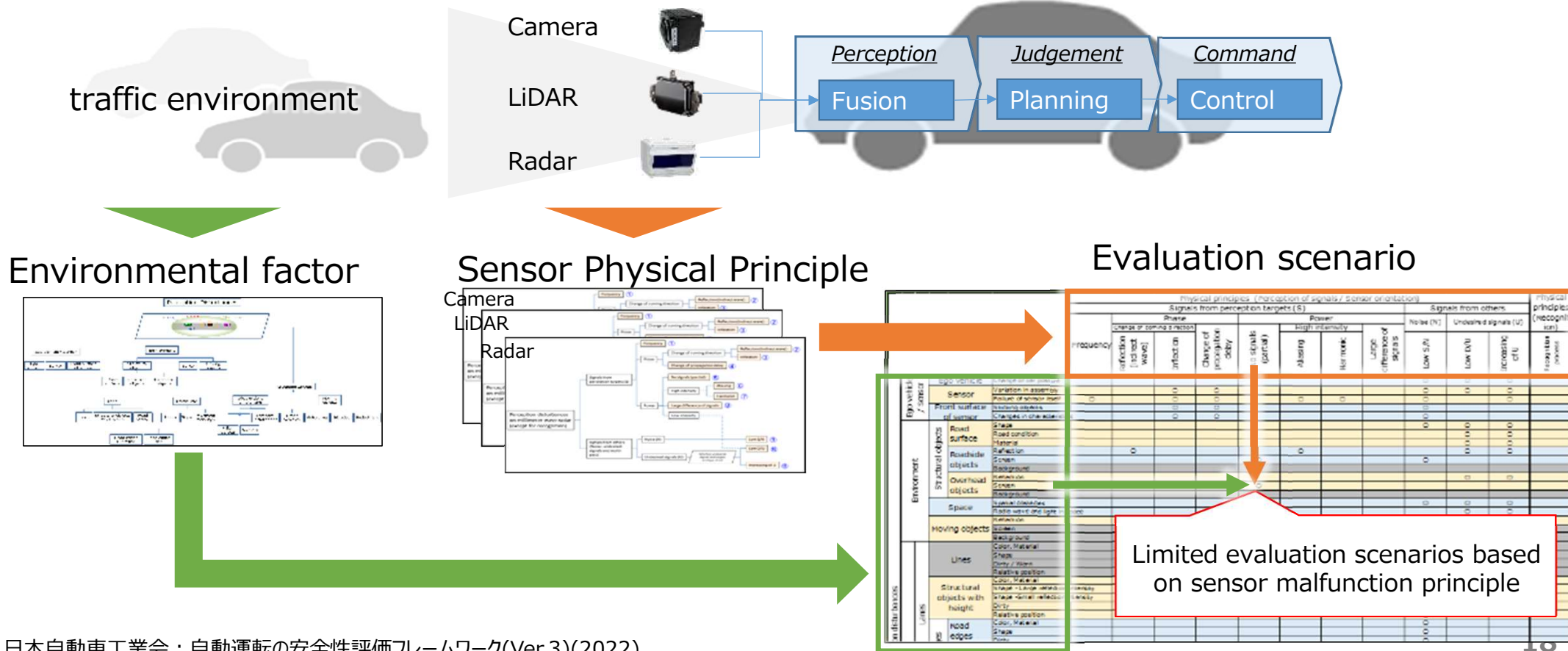
対歩行者シナリオ(8パターン)

Road geometry and Sub. vehicle behavior		Pedestrian behavior	
		Walk in driving path	Cross driving path
Non intersection	Go straight	P01	P02
	Lane change	P03	P04
Intersection	Go straight	P05	P06
	Turn	P07	P08

原理原則に基づく体系的なシナリオ定義 (2/2)

認識外乱

発生する外乱要因を、センサ原理に基づく現象（不調原理）により必要十分な評価範囲に限定



目次



- 1 自動運転システムが具備すべき安全性
- 2 自動運転の安全性評価フレームワーク (Ver.3)
- 3 安全性評価手法：合理的予見可能性と防止可能性の定義**
- 4 安全性評価手段：シナリオデータベースの開発状況
- 5 シナリオベースの安全性評価の要件・ポイント

モビリティDX検討会・安全性評価戦略サブWG



モビリティDX政策の検討体制

- デジタル技術を通じて、多様なプレーヤーとともにビジネスを革新し、新たな付加価値を提供するモビリティ産業を創出し、国際競争力を強化につなげていくための方策を議論するための官民検討体制を整備。



安全性評価

- ✓ 交通シナリオ
- ✓ シミュレーション
- ✓ 国際調和

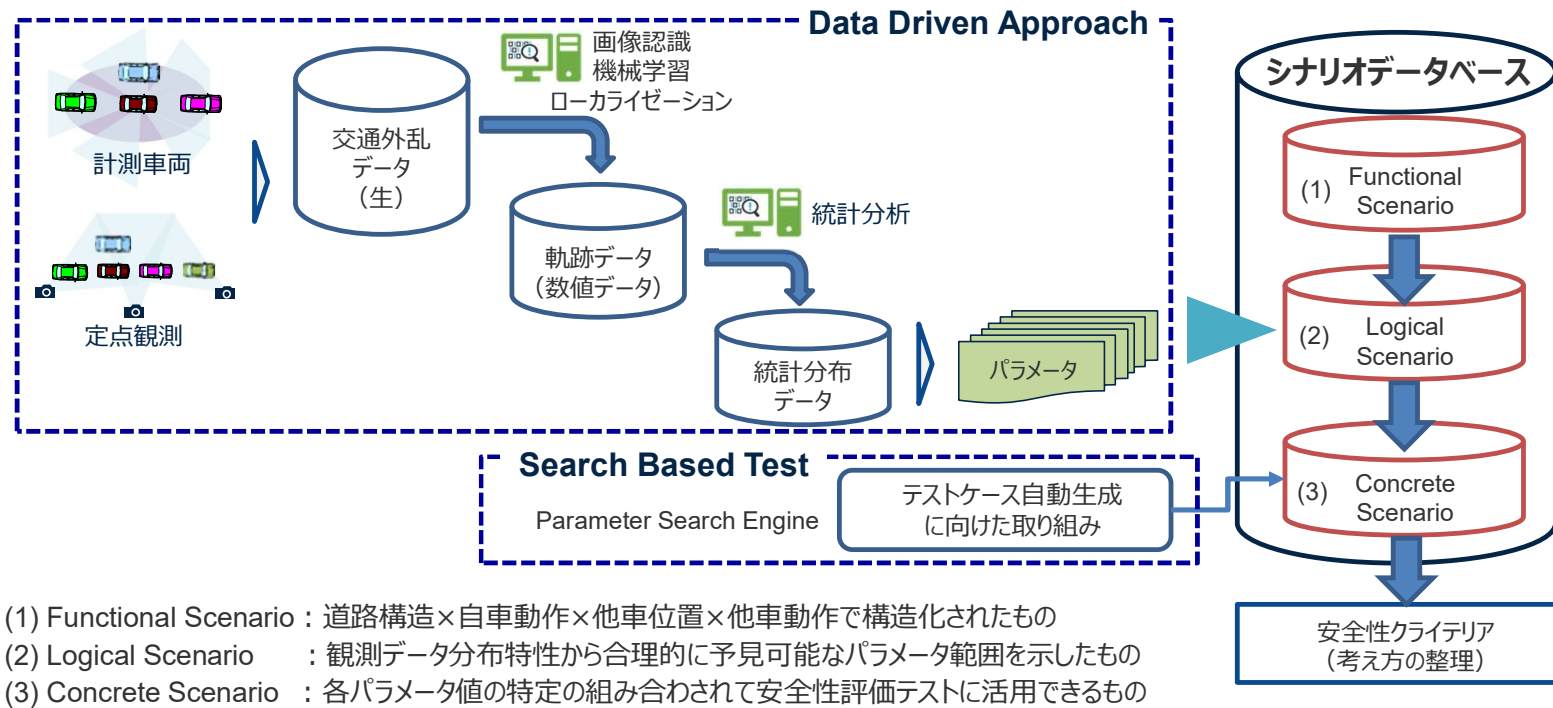
5

SAKURAプロジェクト*概略

◆ プロジェクトの目的

国際動向をふまえて自動運転システムの安全性を評価する手法を開発すること

◆ 自動運転システムの安全性評価手法（キーワード：テストシナリオ，一般道）

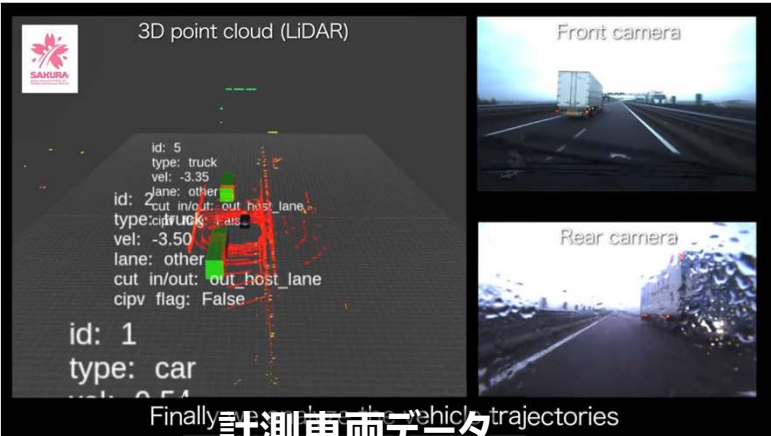


* SAKURAプロジェクト：無人自動運転等のCASE対応に向けた実証・支援事業(自動走行システムの安全性評価基盤構築に向けた研究開発プロジェクト)

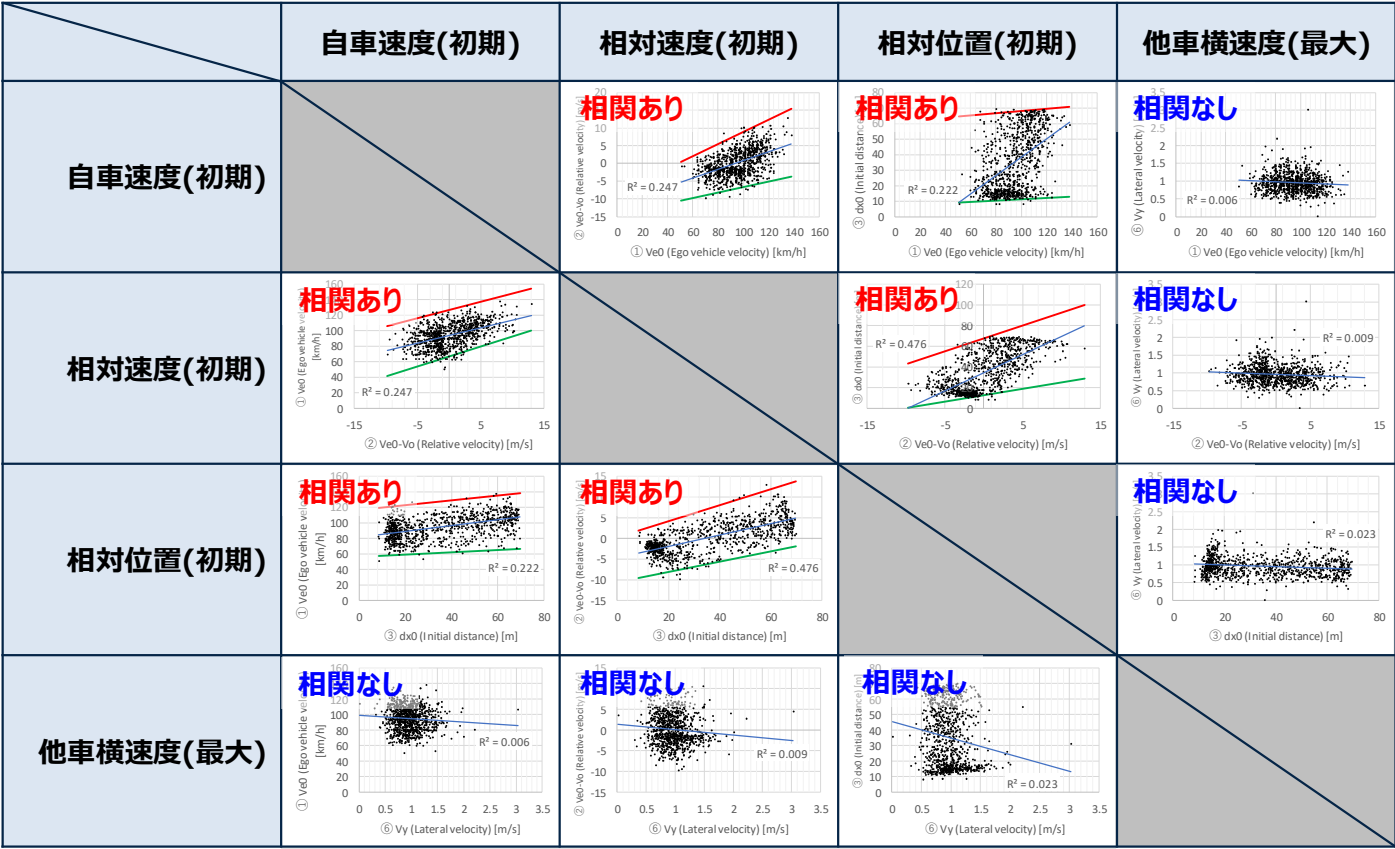
合理的に予見可能な範囲の定義



◆ 実交通流データ(計測車両/定点観測)の分析による評価条件の定義（カットインシナリオ）



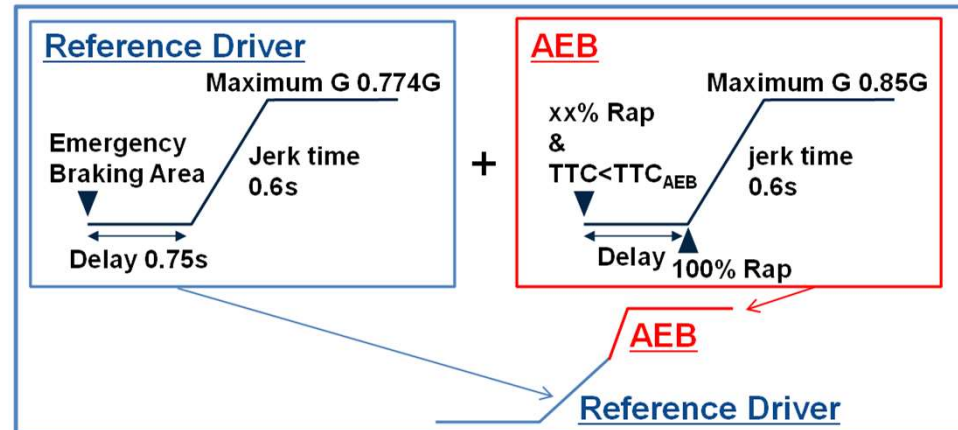
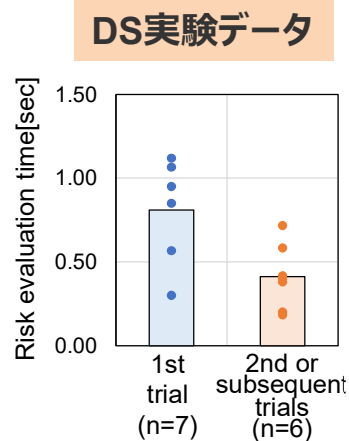
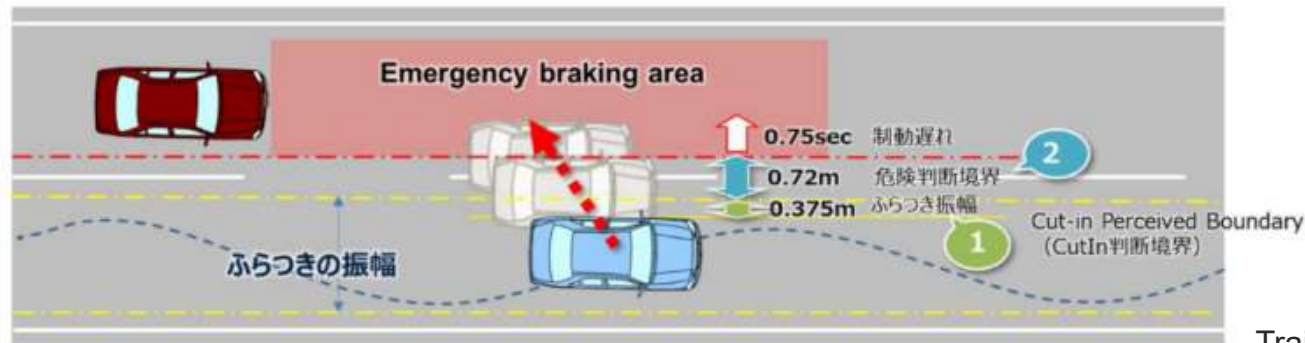
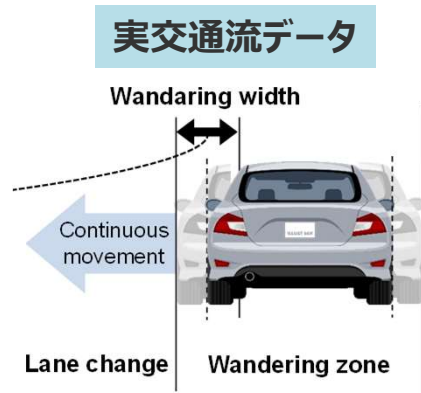
パラメータの分布/相関の分析



予見可能性：シナリオごとに実交通流の実態に基づいて起こりえる範囲を推計

防止可能な範囲の定義

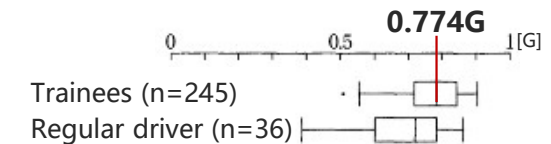
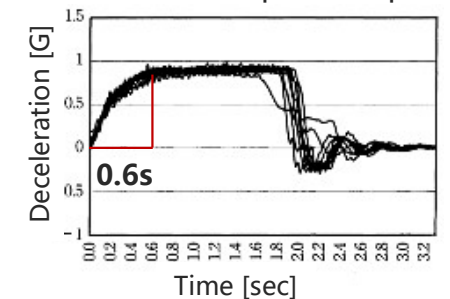
◆ 注意深く有能な人間ドライバの回避行動モデルとの比較（カットインシナリオ）



注意深く有能なドライバの操作に自動ブレーキが追加

先行研究/文献調査

Trainees' brake operation profiles

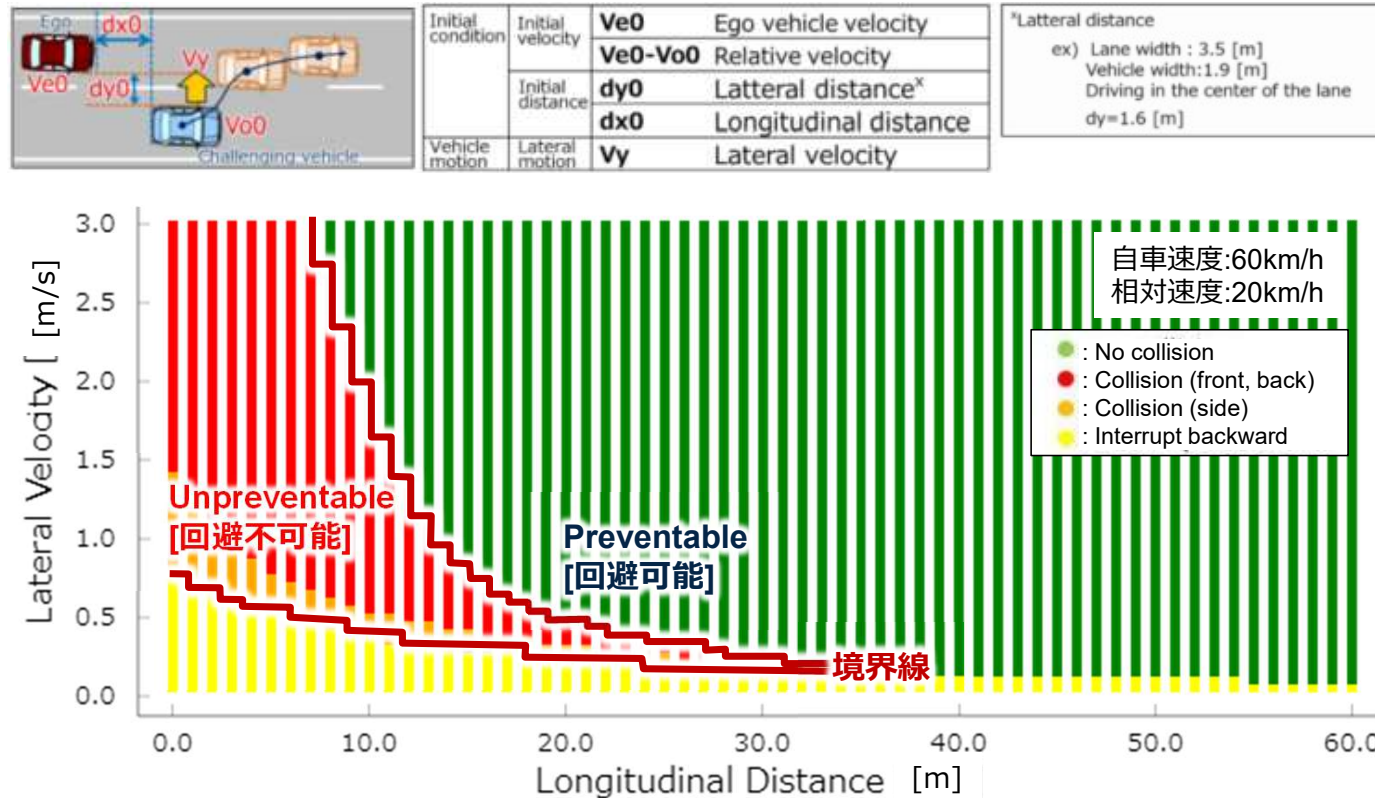


Makishita et al. (2001)

防止可能性：人間ドライバとの比較によって自動運転車が防止すべき範囲を判別

国際基準(UN-R157)のカットインシナリオ

◆ 自動運転車が具備すべき安全性の評価条件の具体例



(UNECE: Proposal for a new UN Regulation on uniform provisions concerning the approval of vehicles with regards to Automated Lane Keeping System)

合理的に予見可能, かつ, 防止可能な領域を判別する手法を提案

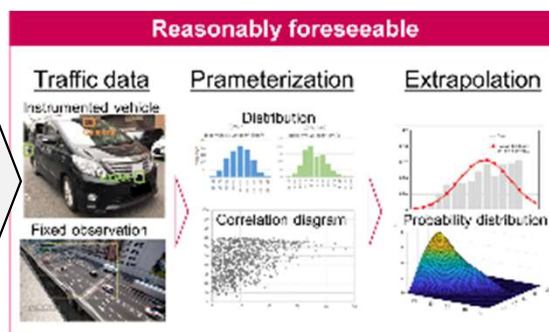
SAKURAプロジェクトの安全性評価手法の特徴



◆ シナリオ体系に基づいて予見可能 & 防止可能な評価条件を特定

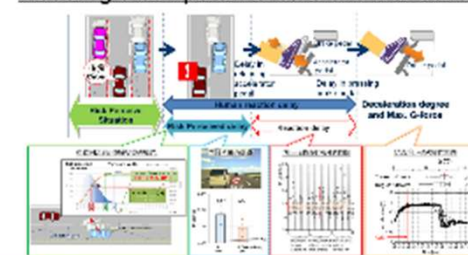
■ 予見可能性の定量化

- ・実交通データ計測/分析
- パラメータ分布の推定
- 合理的に予見可能な範囲の推定



Preventable

Modeling a competent & careful driver behavior



■ 防止可能性の定量化

- ・注意深く有能なドライバーのモデル化
- 防止可能な境界

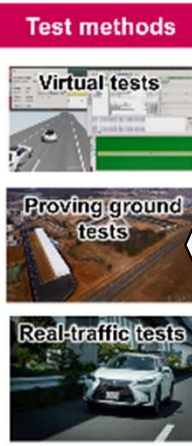
■ 評価シナリオの出力

- ・ユーザが範囲を指定
- ・Regulationに準拠 (UNR157等)
- ・標準形式で出力



Scenarios

Results



■ さまざまな試験手法と接続

- ・シミュレーション試験
- ・テストコース試験
- ・公道走行試験

網羅的なシナリオ体系から必要十分な範囲に限定したシナリオを提供する手段が必要

目次

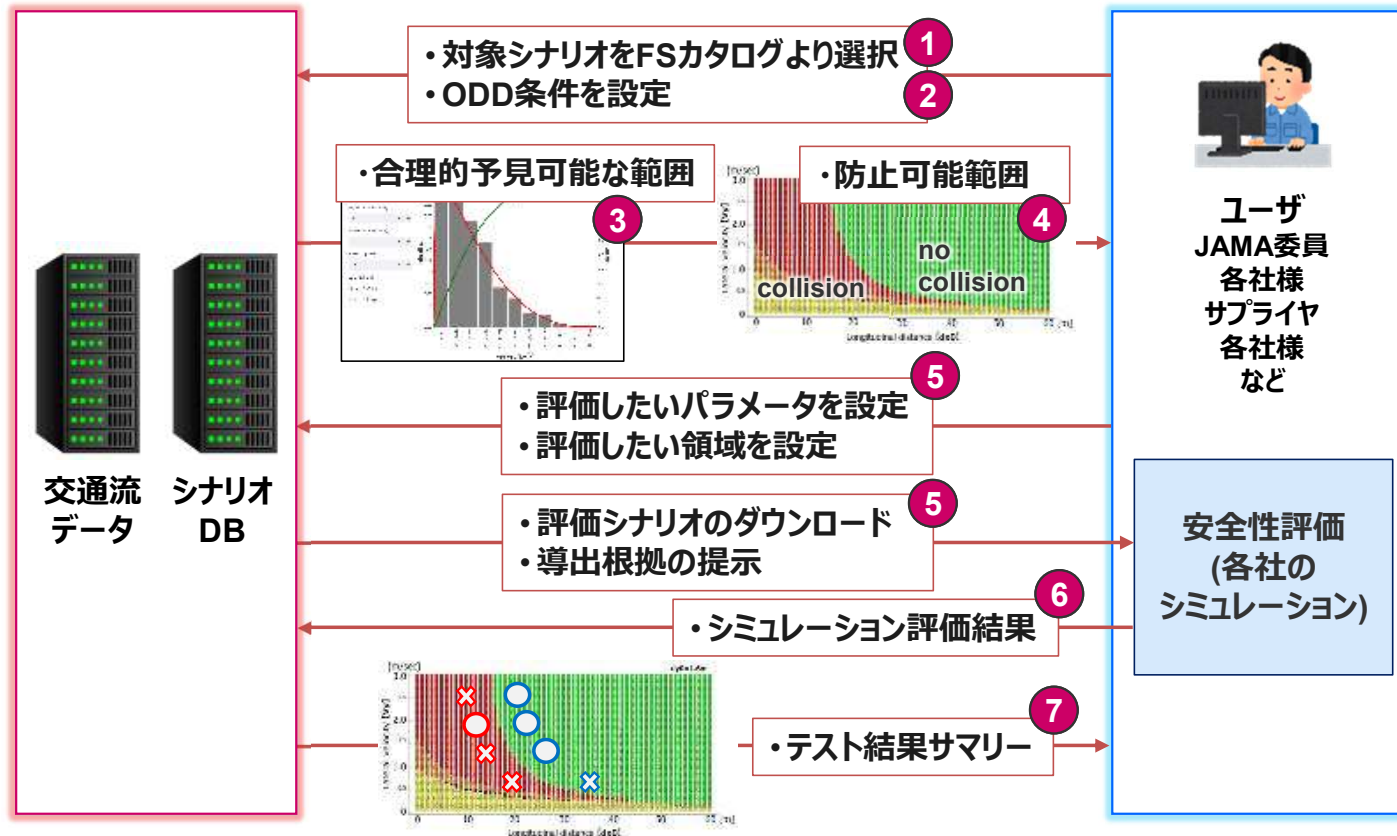


- 1 自動運転システムが具備すべき安全性
- 2 自動運転の安全性評価フレームワーク (Ver.3)
- 3 安全性評価手法：合理的予見可能性と防止可能性の定義
- 4 安全性評価手段：シナリオデータベースの開発状況**
- 5 シナリオベースの安全性評価の要件・ポイント

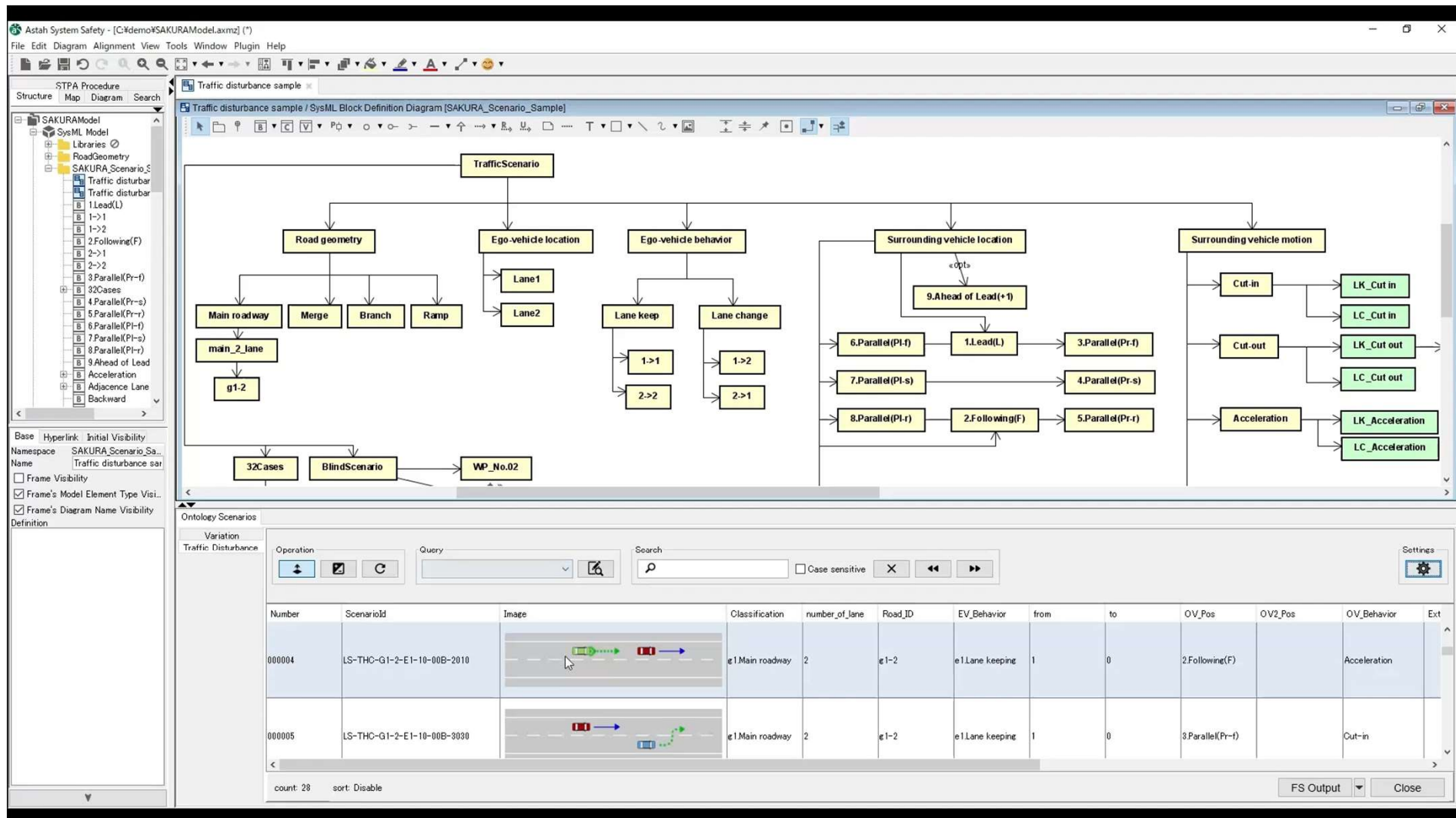
安全性評価手段：シナリオデータベース(DB)

◆ シナリオDB：網羅的な体系と合理的に予見可能で防止可能なシナリオを収録

ユースケース例 評価シナリオをダウンロードし，自社シミュレーションで評価・結果を管理



①：網羅的なシナリオ体系のモデル化



②: 評価シナリオのカタログ

<

Scenario Database

Project: FY2023 AD FMC

UserID: scenario_demo_f

SIGN OUT

Scenario Library

Scenario Library

> Scenarios

Scenario List

Q Search X

SCENARIO PROCESS

Scenario ID	Overview	Case ID ↑	Classification	Ego Behavior	Other Position	Other Behavior	Unsafe
No records to display							

10 rows |< < 0-0 of 0 > >

◆ ODDに基づき評価対象シナリオを選択

③：実交通流データの分析結果との連携（カットイン）

- ◆ 評価対象シナリオを選択
- ◆ ODDに基づき自車パラメータ範囲を決定
- ◆ 遭遇頻度の上下限を設定
- ◆ 合理的予見可能なパラメータ範囲を決定



4: C&Cドライバの防止可能範囲



<

Scenario Database

Project: FY2023 AD FMC

UserID: scenario_demo_f

SIGN OUT

Dashboard

Project

Scenario Library

Traffic Data

Pass/Fail Criteria

Test Specification

Test Plan

Test Result

Import Test Result

Vehicle Specifications

No records to display

ALKS

+ RUN TEST

> CUTIN

TestCase : 0
Scenario : 0

Executed

Not Executed

Pass

Fail

> CUTOUT

TestCase : 0
Scenario : 0

Executed

Not Executed

Pass

Fail

> DECELERATE

TestCase : 0
Scenario : 0

Executed

Not Executed

Pass

Fail

EURO NCAP

+ RUN TEST

> AEB VRU Test Protocol

> AEB Car-to-Car Test Protocol

> LCC Test Protocol

- ◆ UN R157 シナリオが対象
 - 他のシナリオは順次アップデート
- ◆ C&Cドライバモデルが回避可能な範囲を提示

5: 評価テスト仕様の作成



◆ 合理的予見可能範囲，防止可能範囲を参照してテスト仕様を作成

◆ OpenSCENARIO/DRIVEファイルを出力

The screenshot displays the 'Scenario Database' web application. The left sidebar contains navigation links: Dashboard, Project, Scenario Library, Traffic Data, Pass/Fail Criteria, Test Specification, Test Plan, Test Result, and Import Test Result. The main content area is divided into two panels. The left panel, titled 'Test Specification', shows a tree view of test cases under 'ALKS' and 'ALL test data'. The right panel, titled 'Test Case', shows a form for creating a new test case with fields for 'Test Case Name' and 'Test Case Description'. Below the form are 'APPLY' and 'CANCEL' buttons. The bottom panel shows the 'Test Plan' for 'ALKS Cutin Ego60km-Relative40km-JAR...' with 'EXECUTE' and 'SHOW CI STATUS' buttons. The 'Test History' section shows a list of test runs, including one with ID '#1 2021-11-09T02:19:24'. The right panel shows the 'Result' for the test, including 'Collision' (Yes), 'Parameter' (CS Generation, Simulation), and 'Simulated Data' (OpenSCENARIO, OpenDRIVE). The 'Result' section also includes a 'Movie' link. The 'Simulated Data' section includes 'DOWNLOAD' links for each data type.

PROJECT	FS	CS	PREVENTABLE
CS ID : LS-THC-G1-2-E1-10-00B-3030-00000001			
Result			
Collision	Yes		
Parameter			
CS Generation	DOWNLOAD		
Simulation	DOWNLOAD		
Simulated Data			
OpenSCENARIO	DOWNLOAD		
OpenDRIVE	DOWNLOAD		

6: 評価テスト結果インポート

Scenario Database

Project: FY2023 AD FMC UserID: scenario_demo_f SIGN OUT

Test Plan: ALKS Cutin Ego60km-Relative40km-DIVP

EXECUTE SHOW CI STATUS

Test History

- #2 running
- #1 running

Functional Scenario List

FS ID	Count	Not Executed	%	Executed	%
LS-THC-G1-2-E1-10-00B-3030	5	5	100.0	0	0.0

25 rows |< < 1-1 of 1 > >|

◆ 個々の試験条件の衝突可否をインポート



Legend: Executed (green), Not Executed (red), NonCollision (green), Collision (red)

7: 評価テスト結果サマリー

<

Scenario Database

Project: FY2023 AD FMC

UserID: scenario_demo_f

SIGN OUT

Dashboard

Project

Scenario Library

Traffic Data

Pass/Fail Criteria

Test Specification

Test Plan

Test Result

Import Test Result

Vehicle Specifications

EDIT

No records to display

ALKS

+ RUN TEST

> CUTIN

TestCase : 0
Scenario : 0

Executed

Not Executed

Pass

Fail

> CUTOUT

TestCase : 0
Scenario : 0

Executed

Not Executed

Pass

Fail

> DECELERATE

TestCase : 0
Scenario : 0

Executed

Not Executed

Pass

Fail

EURO NCAP

+ RUN TEST

> AEB VRU Test Protocol

> AEB Car-to-Car Test Protocol

> LSS Test Protocol

目次



- 1 自動運転システムが具備すべき安全性
- 2 自動運転の安全性評価フレームワーク (Ver.3)
- 3 安全性評価手法：合理的予見可能性と防止可能性の定義
- 4 安全性評価手段：シナリオデータベースの開発状況
- 5 シナリオベースの安全性評価の要件・ポイント**

シナリオを用いた自動運転の安全性評価の要件・ポイント



論点

どのように**評価シナリオを必要十分に限定する**のか？

- ・長距離の耐久走行試験だけでは安全の説明性は確保できない
- ・交通環境に存在する森羅万象すべての評価はできない



自動運転の安全性評価フレームワーク
Ver. 5.0

一財団法人 交通安全財団
道路運送車両の安全に関する技術の普及
2022年11月

- ・運転行動の3要素「**認識外乱(認知)**・**交通外乱(判断)**・**車両運動外乱(操作)**」でシナリオを体系化
⇒原理原則が異なる3要素毎に安全観点で網羅的なシナリオ体系を構築
- ・認識外乱シナリオは、**不調要因**と**センサー原理**でシナリオを体系化し、必要十分に限定



- ・上記を折り込んだ日本提案手法（ISO 34502）の継続的なプレゼンスの向上
- ・実現手段として、SAKURAシナリオDBへシナリオ実装

自動運転の安全要件を満たすことを示すための評価手法・手段を開発中

【参考】国内の自動運転プロジェクト間の連携状況

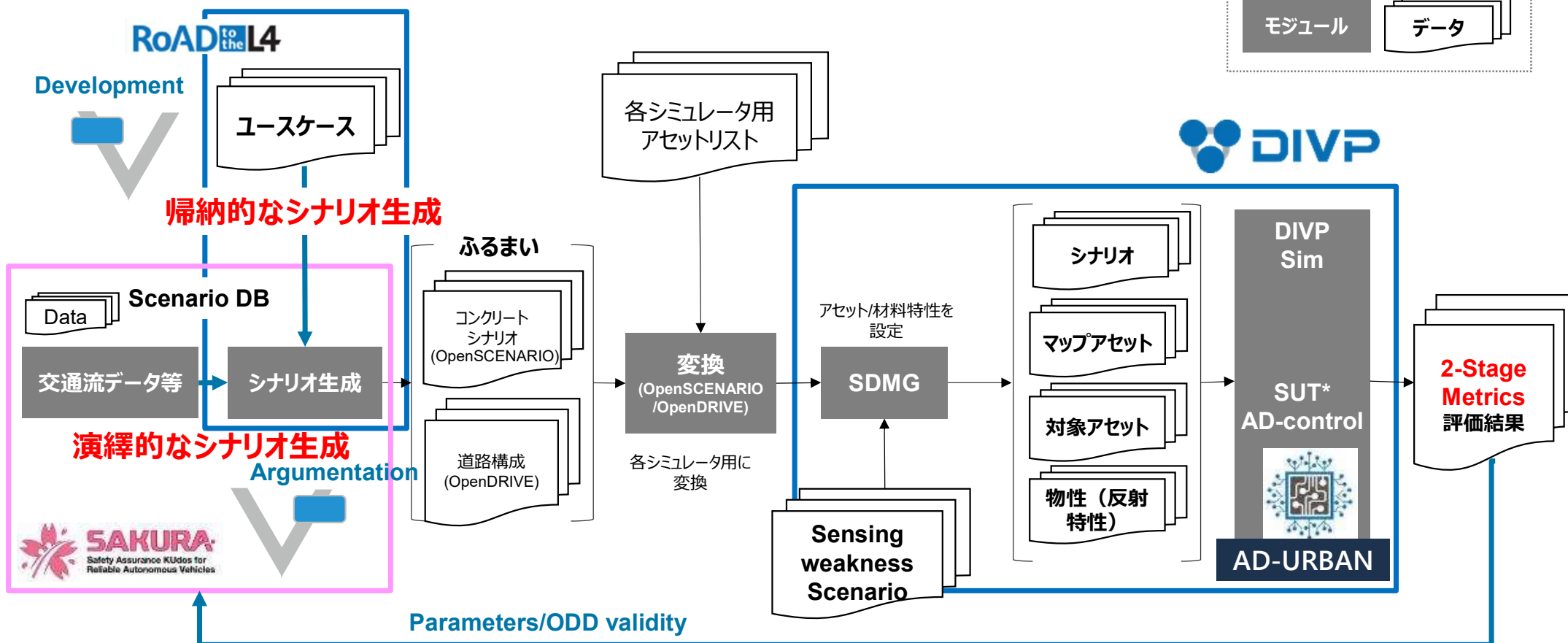


◆ 安全性評価プロジェクト成果連携とRoAD to the L4実例適用 (シナリオDB/シミュレータ/自動運転システム)

判例

モジュール

データ



ご静聴ありがとうございました



<https://www.sakura-prj.go.jp/>



本講演は、経済産業省「無人自動運転等のCASE対応に向けた実証・支援事業（自動走行システムの安全性評価基盤構築に向けた研究開発プロジェクト）」の成果の一部をまとめたものであり、関係各位に対して謝意を表します。