



# 自動運転車の安全性評価 —シナリオベースの評価手法と国際標準化—

北島 創

(一財)日本自動車研究所 自動走行研究部



# 自動運転車の安全性評価 = 協調領域

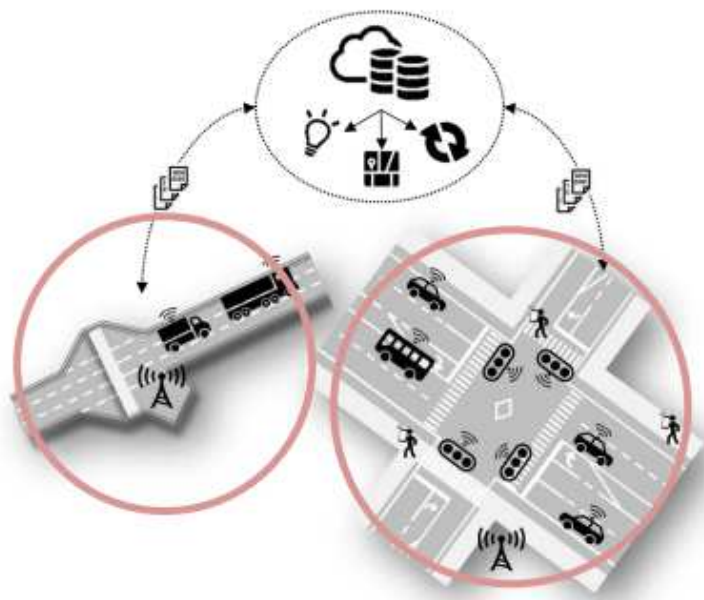
## ◆ 安全性評価：国際競争力の確保・強化のための一課題



# 安全性評価戦略WGの議論スコープ

## ◆ 自動走行ビジネス検討会の協調領域(X.安全性評価)に対応する会議体

【デジタル化を通じた将来像】



【必要な取組】



クルマのデジタル化への対応  
(E/Eアーキテクチャの変革 / ビークルOSの開発 /  
AD・ADASの高度化 等)



移動・物流サービスモデルの構築  
(事業性の構築 / 社会受容性の向上 等)



開発・実装に向けた環境整備  
(安全性評価手法の確立 / インフラ整備 /  
V2X通信の活用 / 法制度 / 人材確保 等)

### 「安全性評価戦略WG」

- 自動運転車の実用化に向けては、運転者による運転を前提とした従来の安全に対する考え方に加え、自動運転システムが車両の操作を行うことに対応した新たな安全性評価手法を策定することが必要。
- これまでは高速道路における交通外乱のシナリオを検討してきたが、2021年度から交通外乱に加えて認識外乱・車両外乱を体系的に組み合わせたシナリオを検討し、一般道へも拡張するとともに、SIP自動運転・DIVP仮想環境と連携し、自動走行システムの開発プロセス等に活用できる安全性評価基盤の構築を推進。
- さらに、独等の各国と協調して自動走行システムにおけるシナリオベースの安全性評価フレームワークをISOに提案。

# 本日の内容

---

1. 自動運転の安全性評価の動向
2. SAKURAプロジェクト概要
3. 現在の国際標準化の動向
4. まとめと今後の取組み

# 1. 自動運転の安全性評価の動向

(シナリオベースの論証体系：日独の提案手法)



# 自動運転車の安全性をどう評価するのか？

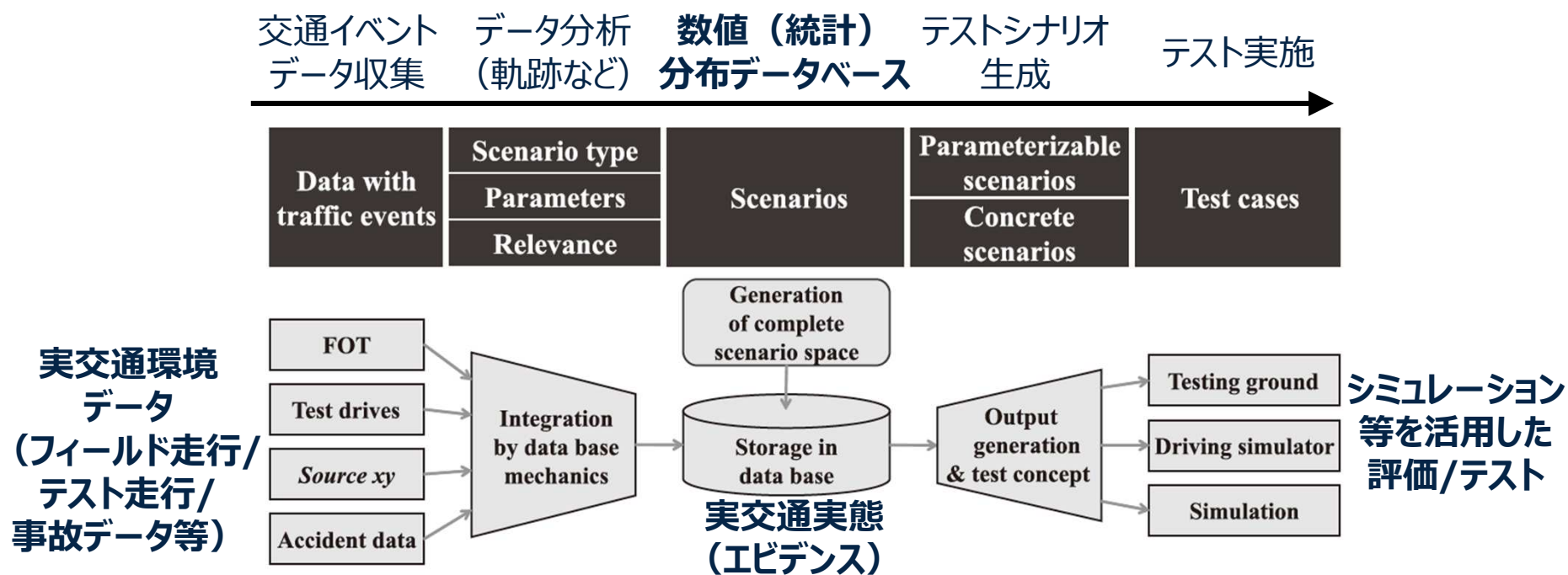
## ◆ 自動運転車の安全性評価の課題

### 【公道実車走行テストの徹底的な実施による評価】

- 誤作動やテストドライバ介入事例を収集・改善して安全性を高める
- 実車公道試験によるランダムサンプリングでは交通イベントの収集が不十分



## 独PEGASUSプロジェクトにおけるシナリオベースの安全性評価アプローチ



# 自動運転車の安全性をどう評価するのか？

## ◆独PEGASUSプロジェクトにおけるシナリオ定義のための6レイヤーモデル

- シミュレーション等によるシナリオベースの安全性評価
- 生成したテストシナリオが十分であることを示す必要性（網羅性の担保）



# 国内における安全性評価手法の取組み

## ◆ 3要素別の網羅的なシナリオ体系と交通外乱シナリオ



### SAKURAプロジェクト検討着手 (2018年度~)

		Surrounding Traffic Participants' Position and Behavior				
		カットイン	カットアウト	加速	減速(停止)	
Road Geometry and Ego-vehicle behavior	本線	レーンキープ	No.1	No.2	No.3	No.4
		レーンチェンジ	No.5	No.6	No.7	No.8
	合流	レーンキープ	No.9	No.10	No.11	No.12
		レーンチェンジ	No.13	No.14	No.15	No.16
	分岐	レーンキープ	No.17	No.18	No.19	No.20
		レーンチェンジ	No.21	No.22	No.23	No.24

(日本自動車工業会:自動運転の安全性評価フレームワークVer2.0)

- ・シナリオ体系：認識・判断・操作の各要素で発生しうる危険を構造化
- ・交通外乱：自車の安全走行を妨げる自車周辺の交通参加者の位置と動作



# 自動運転車が満たすべき安全性

## ◆ 自動運転車の安全性に関する基本的な考え方



### WP29 Revised framework document<sup>1)</sup> (2019年9月)

Under their ODD/OD, AD shall not cause any traffic accidents resulting in injury or death that are **reasonably foreseeable** and **preventable**.

(出典: UN WP29)

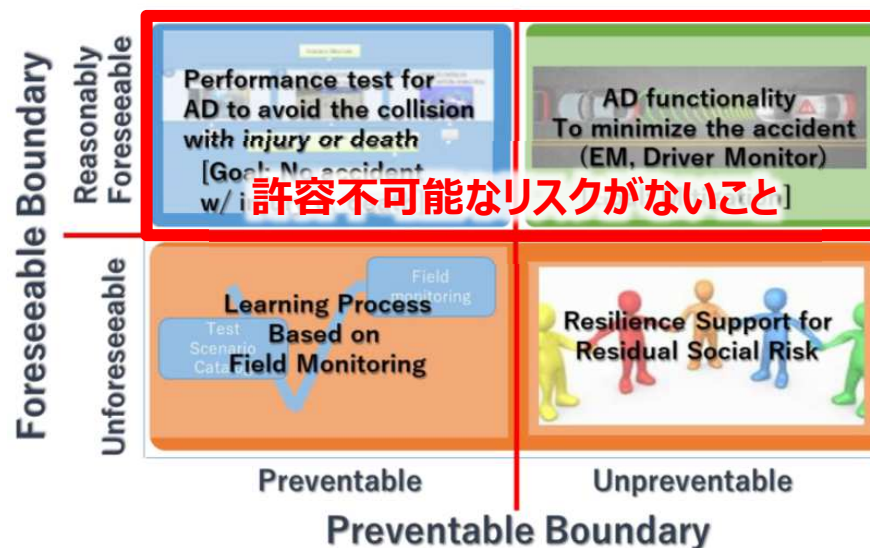


国土交通省

### 自動運転車の安全技術ガイドライン (2018年9月)

自動運転車が満たすべき車両安全の定義を、「許容不可能なリスクがないこと」、すなわち、自動運転車の運行設計領域(ODD)において、自動運転システム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**が生じないことと定める。

(出典: 国土交通省)



- Foreseeable = 予見できる
- Preventable = 防止できる

(日本自動車工業会:自動運転の安全性評価フレームワークVer3.0)

自動運転車の安全：合理的に予見される防止可能な人身事故が生じないこと

# 自動運行装置の国際基準

## 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)

### 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職を担い、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



### 主な要件

- 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作動させ、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：自動運行装置の国際基準の概要)

**自動運転車には、注意深く有能な運転者と同等以上の安全性が求められる**

# 最近の国際的な動向（北米）

◆ 北米サンフランシスコ：ロボットタクシー導入拡大など産業側が意欲的

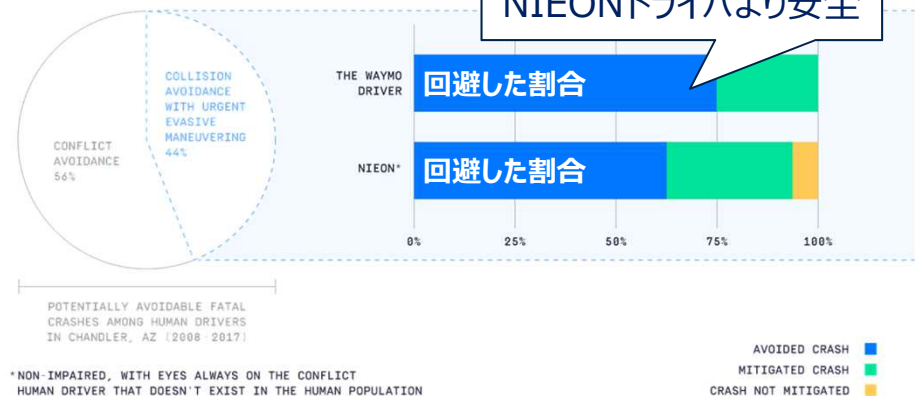
(1) 2023年7月のSan Francisco市内の様子



(2) WaymoのAIドライバの安全性評価：独自のドライバモデル(NIEON)を用いて評価



The Waymo Driver's collision avoidance performance in simulated tests



(Waymo: Benchmarking AV Safety, <https://waymo.com/blog/2022/09/benchmarking-av-safety.html>)



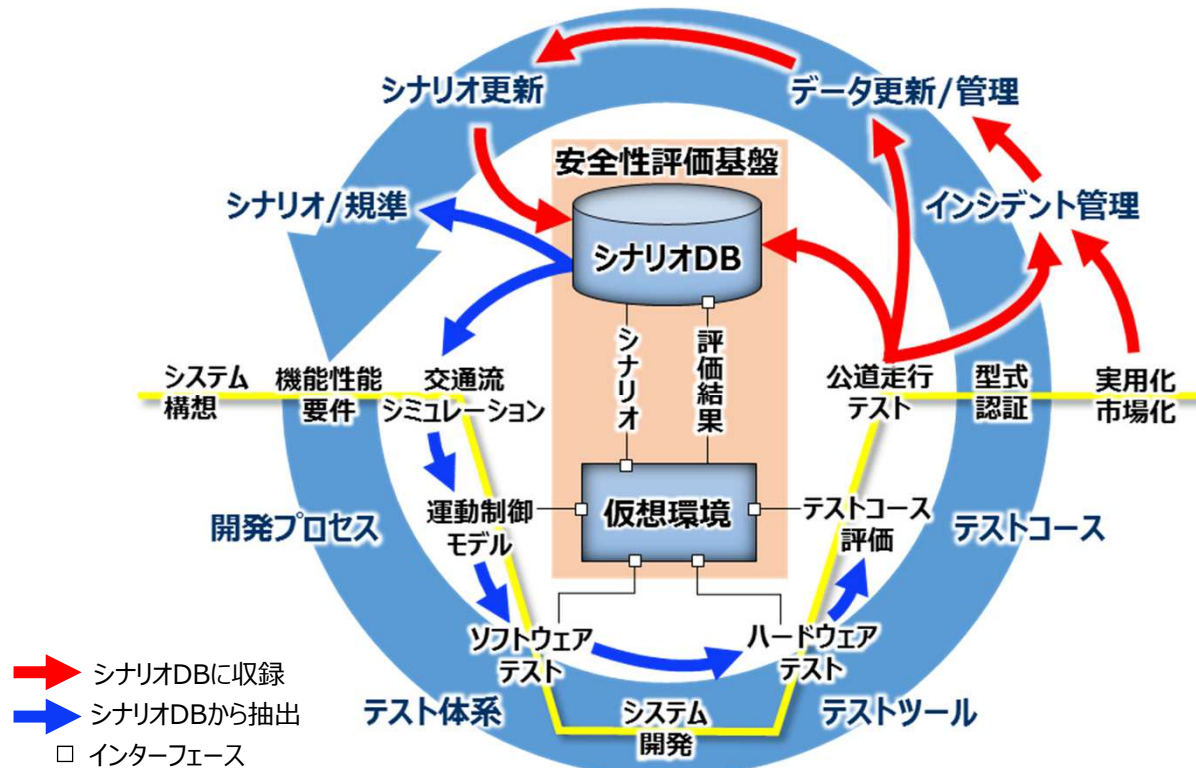
## 2. SAKURAプロジェクト概要

(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)



# 目標：自動運転車の継続的な安全性評価

- ✓ シナリオDBから出力されたシナリオが仮想環境へInputされ、各シナリオの評価結果がシナリオDBにフィードバックされる**安全性評価基盤を構築**する
- ✓ この基盤を核とし、国内外のステークホルダーの技術/データ/知見が連携する仕組みを整備し、**自動走行システムの社会実装を加速するとともに、継続的な安全性評価体制づくりを推進**する



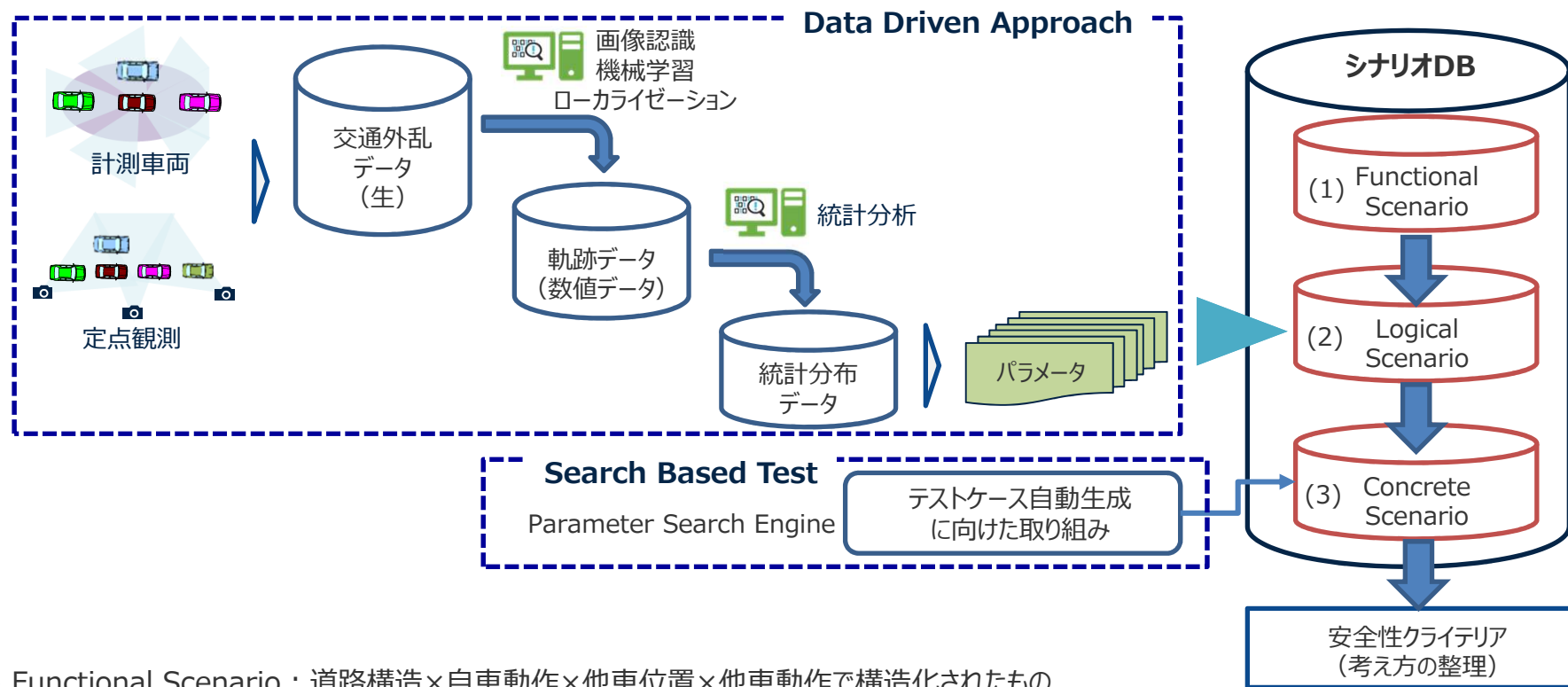


# SAKURAプロジェクト概略

## ◆ 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）



- (1) Functional Scenario : 道路構造×自車動作×他車位置×他車動作で構造化されたもの
- (2) Logical Scenario : 観測データ分布特性から合理的に予見可能なパラメータ範囲を示したもの
- (3) Concrete Scenario : 各パラメータ値の特定の組み合わせられて安全性評価テストに活用できるもの



# 計測車両による交通外乱データの解析例



3D point cloud (LiDAR)

```
id: 5
type: truck
vel: -3.35
lane: other
cut in/out: out_host_lane
cipv flag: False

id: 2
type: truck
vel: -3.50
lane: other
cut in/out: out_host_lane
cipv flag: False
```

```
id: 1
type: car
vel: 0.54
```

Front camera



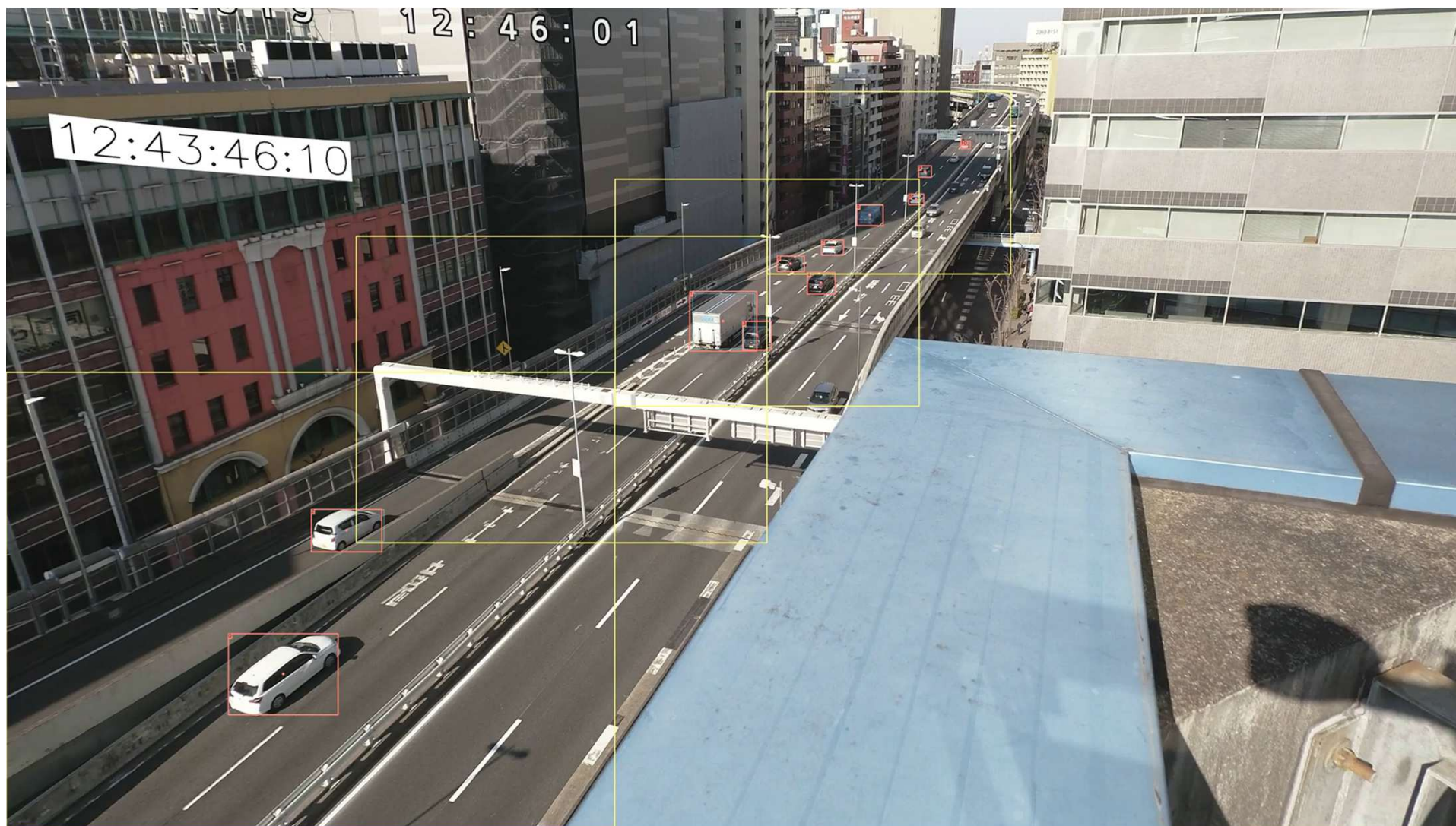
Rear camera



Finally we analyze the vehicle trajectories



# 定点観測による交通外乱データの解析例



# 自専道のシナリオ (24パターン)



## Surrounding Traffic Participants' Position and Behavior

		Road geometry	Ego-vehicle behavior	カットイン	カットアウト	加速	減速(停止)
Road Geometry and Ego-vehicle behavior	本線		レーンキープ	<b>No.1</b> 	<b>No.2</b> 	<b>No.3</b> 	<b>No.4</b> 
			レーンチェンジ	<b>No.5</b> 	<b>No.6</b> 	<b>No.7</b> 	<b>No.8</b> 
	合流		レーンキープ	<b>No.9</b> 	<b>No.10</b> 	<b>No.11</b> 	<b>No.12</b> 
			レーンチェンジ	<b>No.13</b> 	<b>No.14</b> 	<b>No.15</b> 	<b>No.16</b> 
	分岐		レーンキープ	<b>No.17</b> 	<b>No.18</b> 	<b>No.19</b> 	<b>No.20</b> 
			レーンチェンジ	<b>No.21</b> 	<b>No.22</b> 	<b>No.23</b> 	<b>No.24</b> 



# 一般道のシナリオ (58パターン)

: 自専道と共通(24)  
 : 一般道で追加(34)

		周辺車の位置・ふるまい							
		直進(車線維持)		車線変更/進路変更		④ 旋回			
		同方向/交差(右・左)	③ 対向	同方向/交差(右・左)	③ 対向	同方向/交差(右・左)	対向		
道路形状・自車のふるまい	単路	直進(車線維持)	Include Highway Scenario No.3	Include Highway Scenario No.4	Include Highway Scenario No.5	Include Highway Scenario No.6	Include Highway Scenario No.7	Include Highway Scenario No.8	
		車線変更	Include Highway Scenario No.9	Include Highway Scenario No.10	Include Highway Scenario No.11	Include Highway Scenario No.12	Include Highway Scenario No.13	Include Highway Scenario No.14	Include Highway Scenario No.15
	合流	直進(車線維持)	Include Highway Scenario No.16	Include Highway Scenario No.17	Include Highway Scenario No.18	Include Highway Scenario No.19	Include Highway Scenario No.20	Include Highway Scenario No.21	Include Highway Scenario No.22
		車線変更	Include Highway Scenario No.23	Include Highway Scenario No.24	Include Highway Scenario No.25	Include Highway Scenario No.26	Include Highway Scenario No.27	Include Highway Scenario No.28	Include Highway Scenario No.29
	分岐	直進(車線維持)	Include Highway Scenario No.30	Include Highway Scenario No.31	Include Highway Scenario No.32	Include Highway Scenario No.33	Include Highway Scenario No.34	Include Highway Scenario No.35	Include Highway Scenario No.36
		車線変更	Include Highway Scenario No.37	Include Highway Scenario No.38	Include Highway Scenario No.39	Include Highway Scenario No.40	Include Highway Scenario No.41	Include Highway Scenario No.42	Include Highway Scenario No.43
① 交差点	直進(車線維持)								
	② 旋回								

カットイン

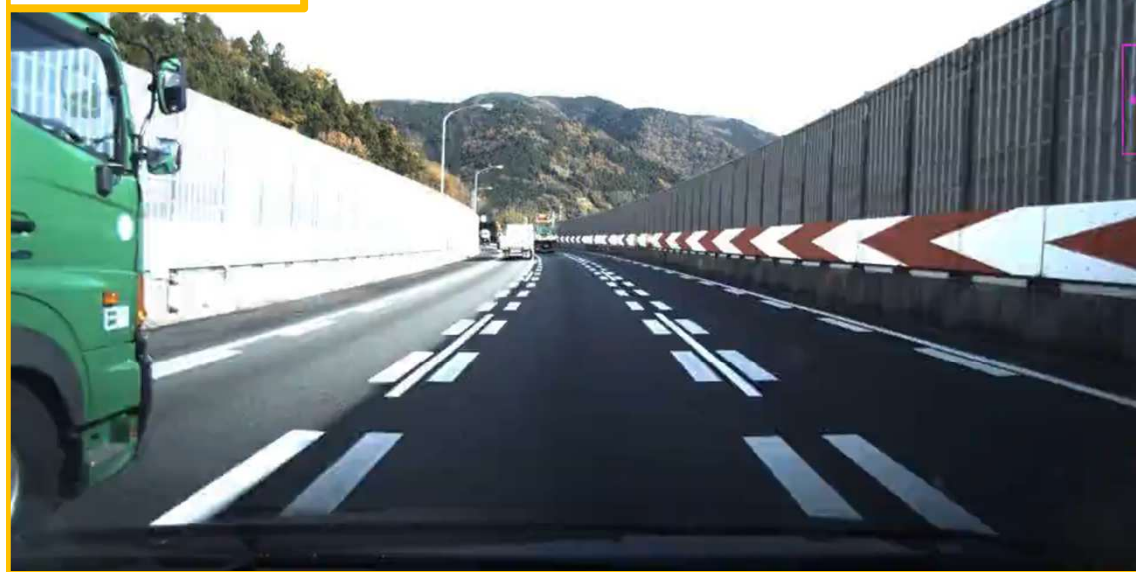
Subject vehicle  
 Surrounding vehicle  
 Surrounding vehicle (+1)  
 Velocity parameters of each vehicles are not described in each picture

**一般道の追加要素**

- ① 道路形状：交差点
- ② 自車ふるまい：旋回
- ③ 他車ふるまい：対向
- ④ 他車ふるまい：旋回

# カットイン事例1 (左レーンから他車が近づく)

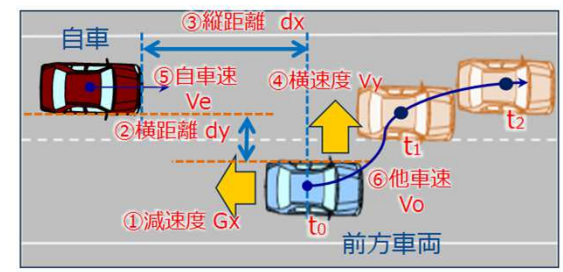
車両前方映像



車両後方映像  
(ミラー)



鳥瞰図  
青：自車  
桃：他車



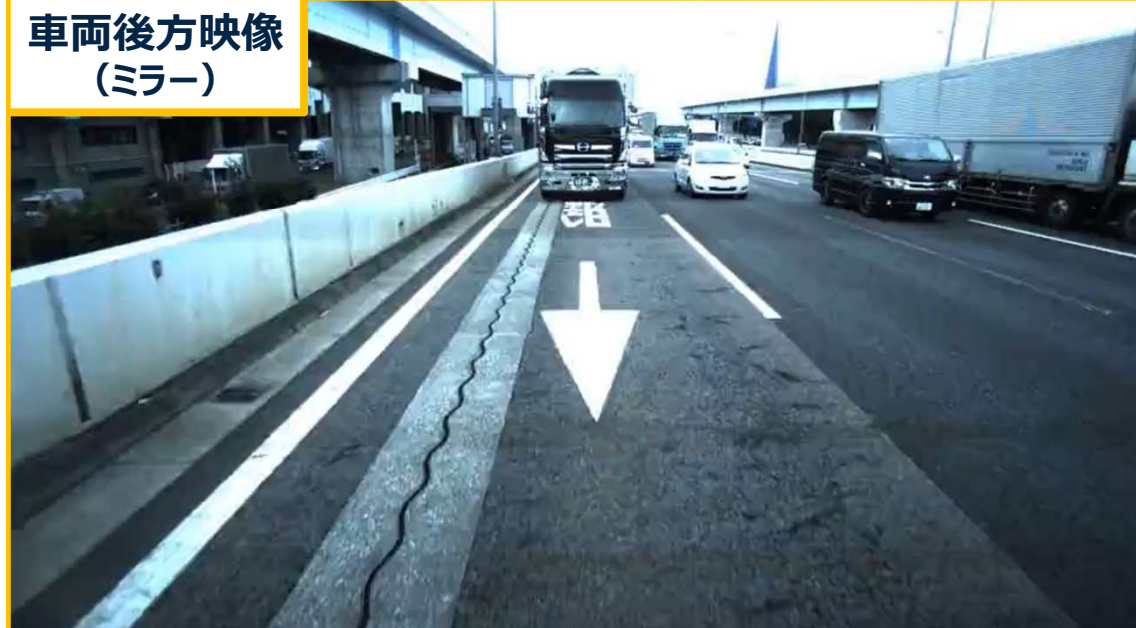
No.	パラメータ	値
①	他車減速度(前後)	[G] 0.03
②	相対位置(左右, 初期)	[m] 9.6
③	相対位置(前後, 初期)	[m] 50.1
④	他車横速度(最大)	[m/s] 4.4
⑤	自車速度(前後, 初期)	[km/h] 94.5
⑥	他車速度(前後, 初期)	[km/h] 89.9

# カットイン事例2（右レーンから他車が近づく）

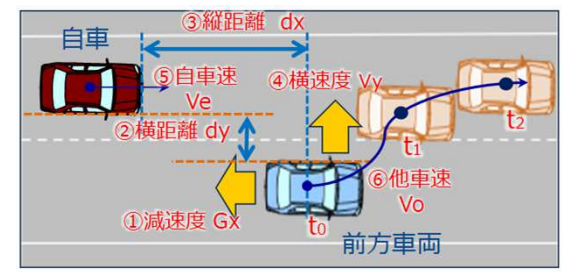
車両前方映像



車両後方映像  
(ミラー)



鳥瞰図  
青：自車  
桃：他車

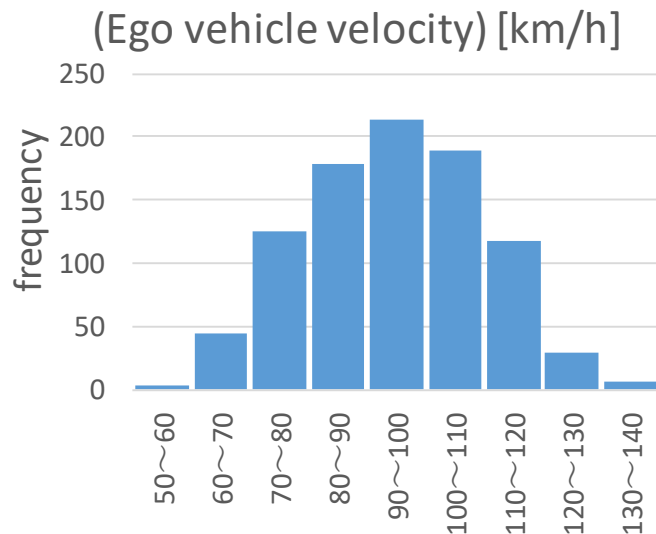


No.	パラメータ	値
①	他車減速度(前後)	[G] -0.07
②	相対位置(左右, 初期)	[m] 3.1
③	相対位置(前後, 初期)	[m] 34.0
④	他車横速度(最大)	[m/s] 1.05
⑤	自車速度(前後, 初期)	[km/h] 44.5
⑥	他車速度(前後, 初期)	[km/h] 22.4

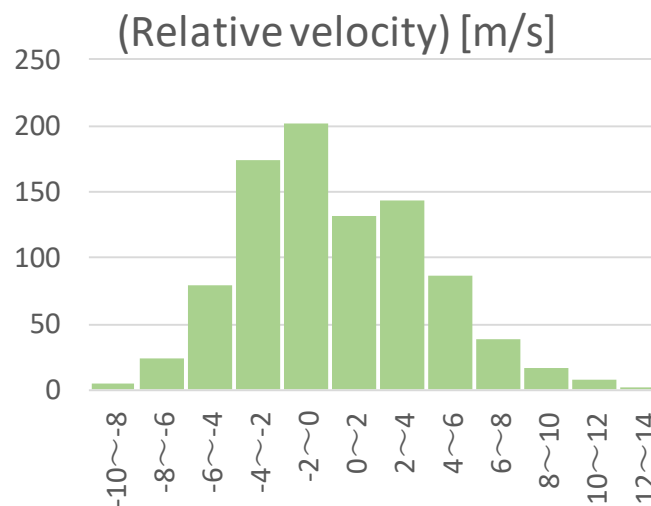


# 他車カットの特征 (データ数 : 911件)

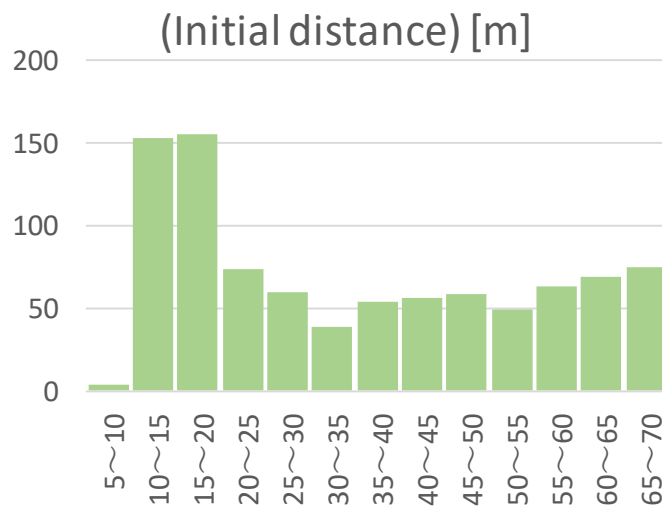
## 自車速度(初期)



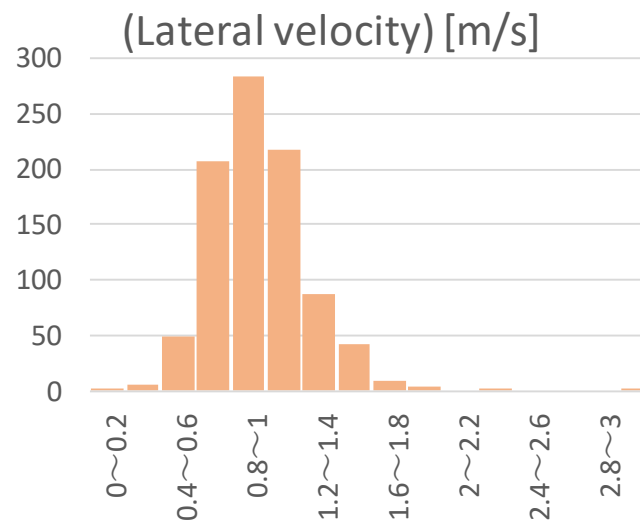
## 相対速度(初期)



## 相対位置(初期)

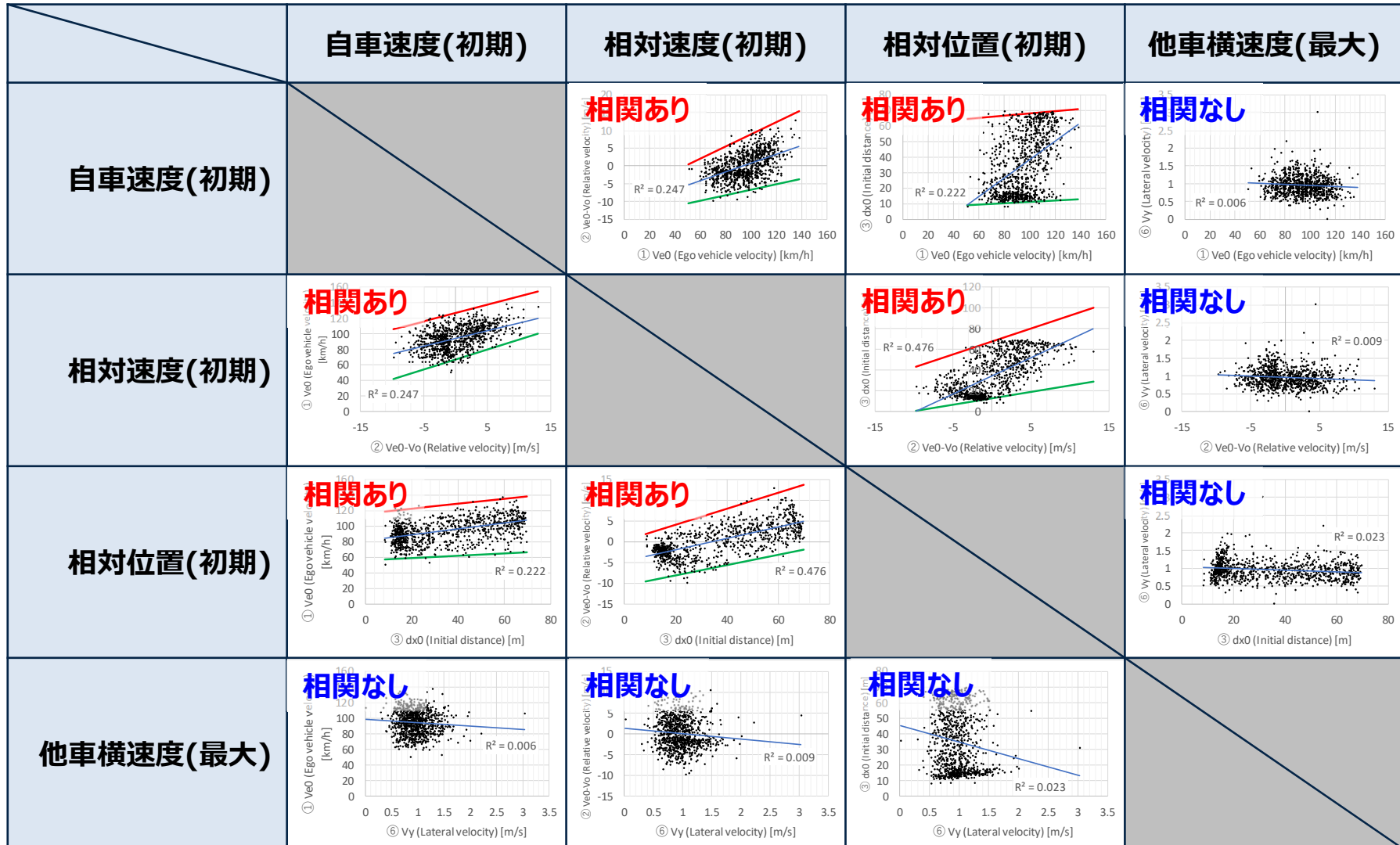


## 他車横速度(最大)



# パラメータ間の相関関係

## ◆パラメータ同士の関係：自車速度・相対速度・相対位置に相関関係あり



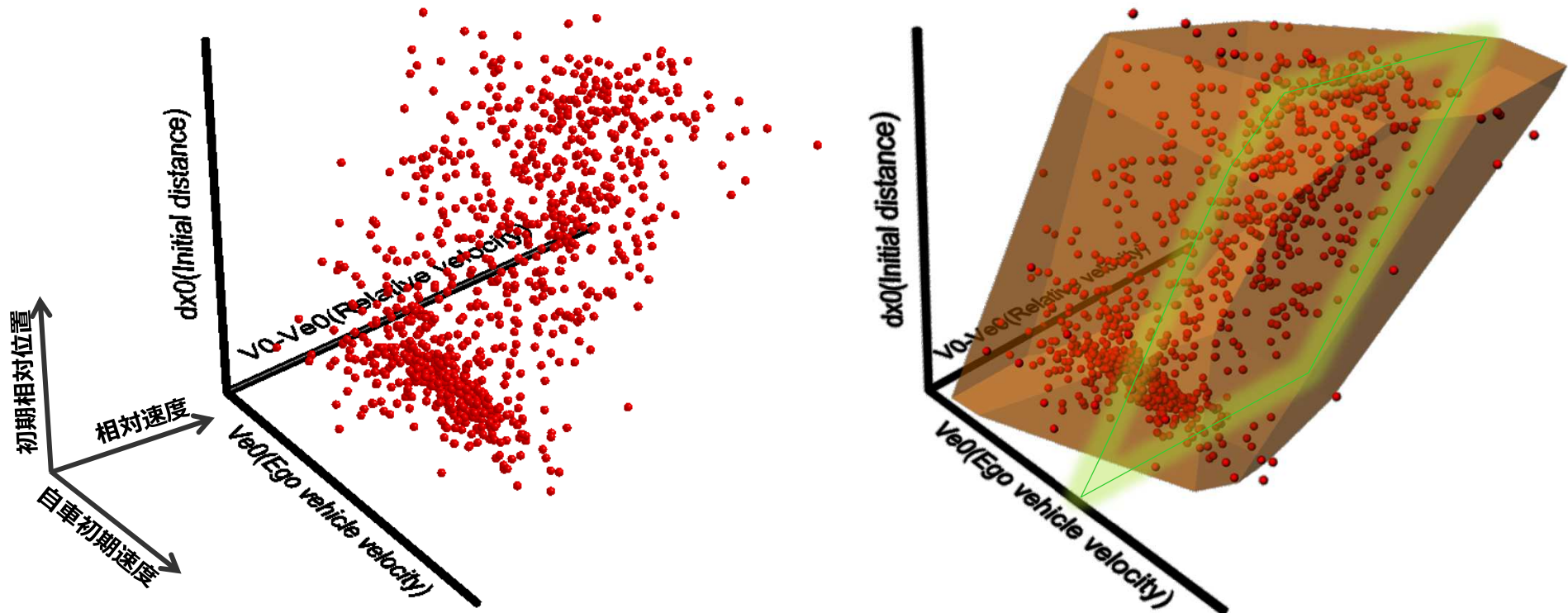


# 予見可能なパラメータ範囲の特定

観測されたデータ(911件)

外挿

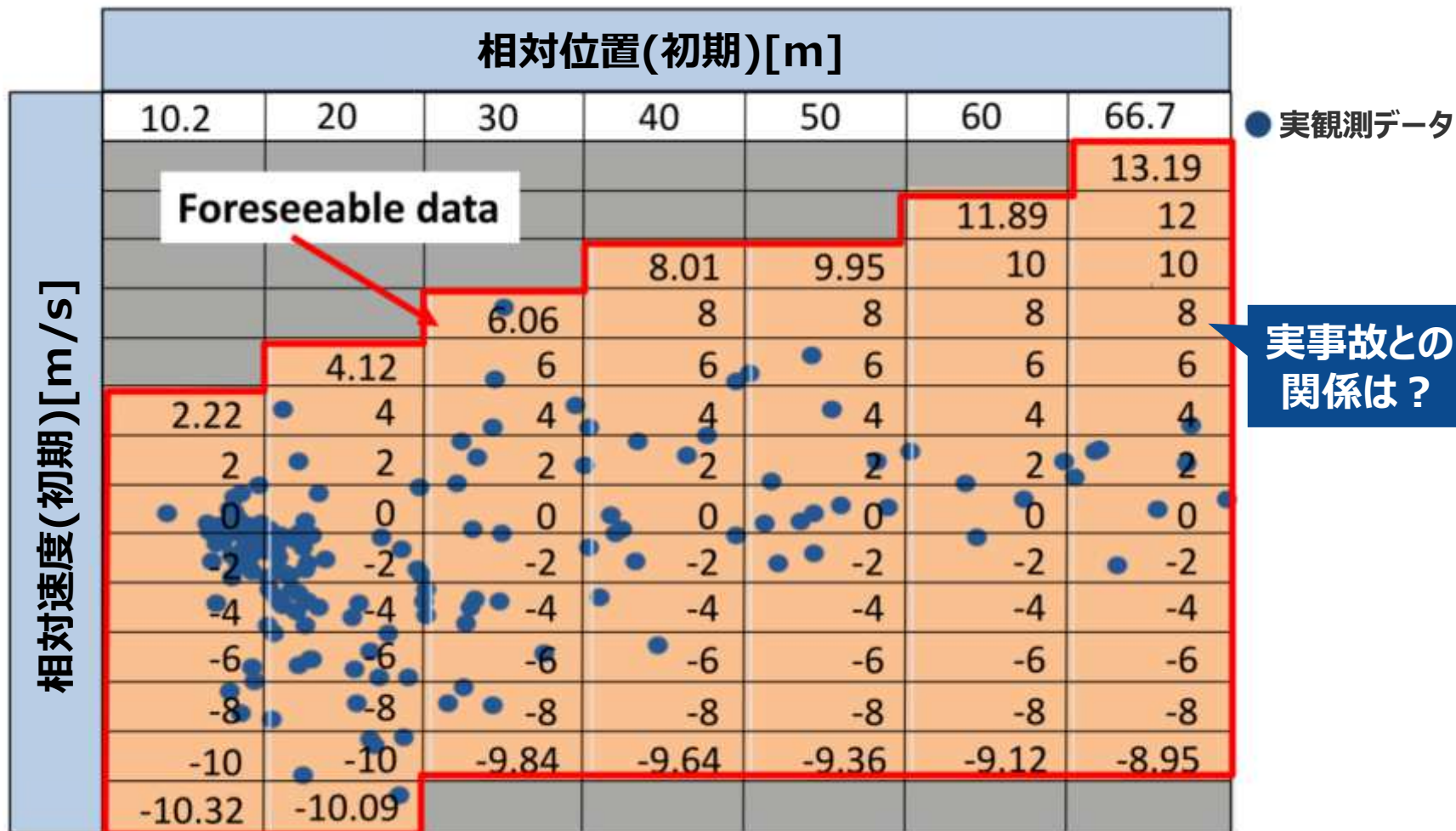
相関関係を考慮して特定した範囲



観測したパラメータ範囲・相関関係を用いて将来起こり得る範囲へ拡張

# 他車カットインのテストシナリオ

自車速度(初期) : 80[km/h], 他車横速度(最大) : 1.72[m/s]



拡張したテストシナリオに実際に事故が起きるような条件が含まれているのか？

# 他車カットイン事故事例（夜，雨天）



カットイン開始タイミング：0.00s，衝突タイミング：2.14s

※詳細な事故調査データから推定した暫定的なカットイン条件



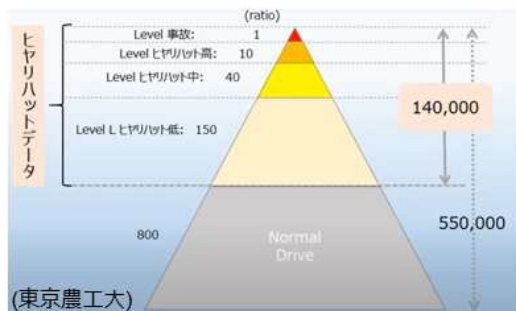
# ドライブレコーダデータのシナリオ化の取組み

## ◆ 事故・ニアミス発生前後の映像/データから自転車・他車軌跡を解析

### 既存データ活用：高リスクシナリオの生成



■ DRデータ(映像/車両データ)に映像解析を適用し、とくに一般道の評価条件の作成に活用



ヒヤリハット・事故データ



### 車載カメラ映像解析プラットフォーム



(富士通)



### ● 自転車と相手軌跡

自車が右の車線へ車線変更、  
右折車線にいた相手車線が  
左車線（自転車車線）に車線変更



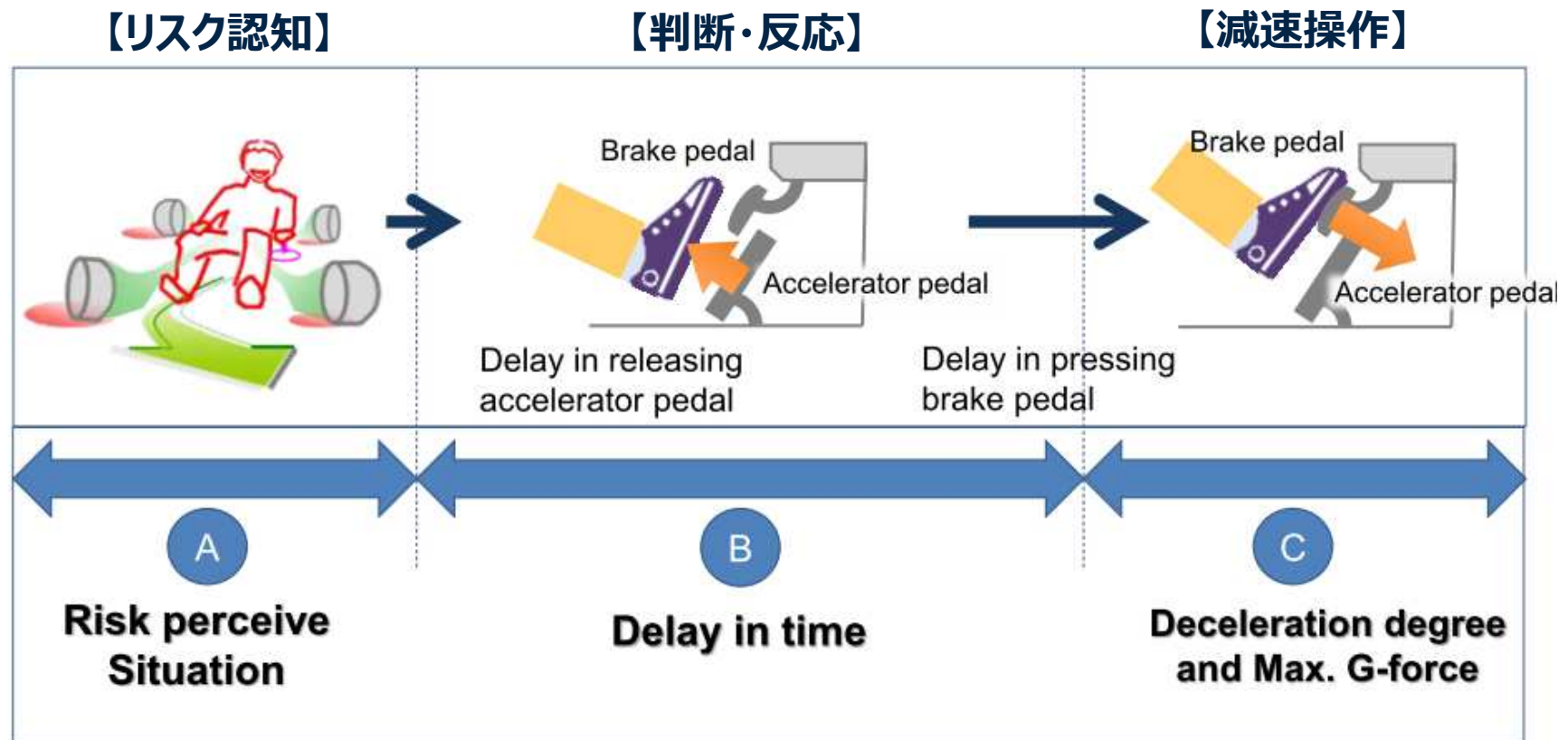
(令和4年度第2回安全性評価戦略WG報告資料より)

衝突リスクの高いシナリオ・複数の他者が関与するシナリオとして活用



# 「注意深く有能な運転者」の考え方(1)

◆ 安全に運転するために運転者が行っていること

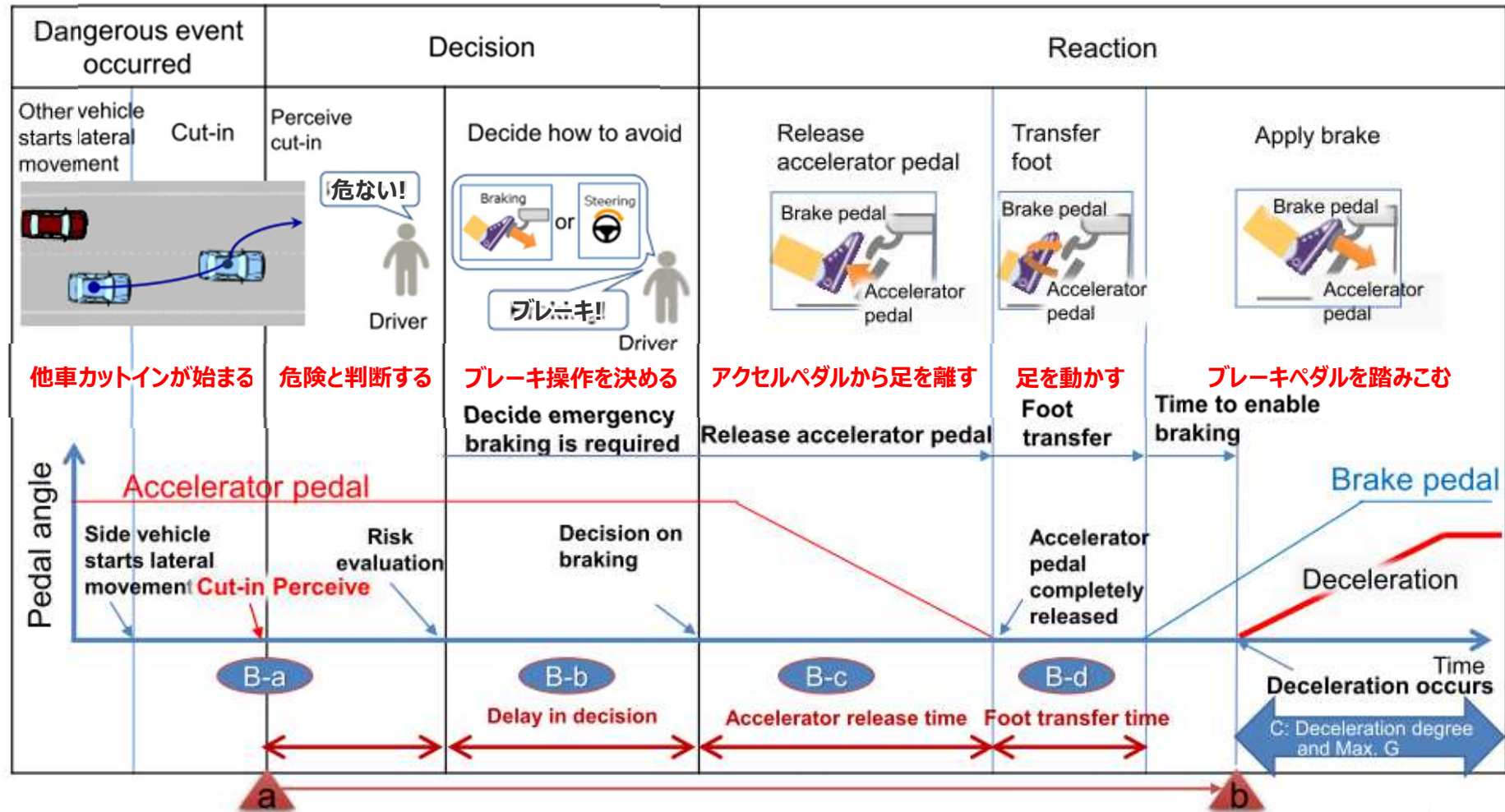


(WP29 GRVA 4th VMAD IWG: Safety Criteria Study on Innovative Safety Validation Methods of Automated Driving Systems)

運転者のブレーキによる衝突回避行動を前提とした安全基準案を検討  
3つのステップ (A)リスク認知, (B)判断・反応, (C)減速操作) の構成

# 「注意深く有能な運転者」の考え方(2)

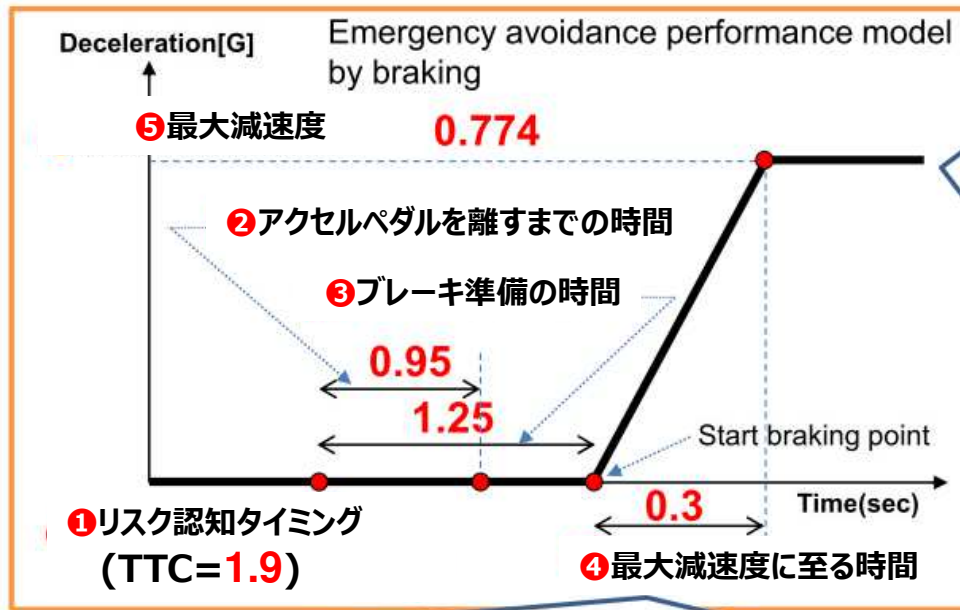
## ◆ 他車がカットインするシーンにおける運転者の対応の流れ



(WP29 GRVA 4th VMAD IWG: Safety Criteria Study on Innovative Safety Validation Methods of Automated Driving Systems)

衝突を避けるための運転者のブレーキ操作を細かく分解して検討

# 「注意深く有能な運転者」のブレーキ操作の模擬

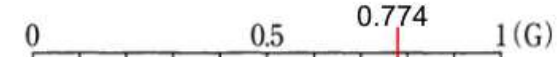


⑤ A study example of emergency braking characteristics of driving trainees in Japan

・General driver : 0.689G

・Driving trainees\* : 0.774G

\*Driving trainees: Trainees of Japan Safe Driving Center (JSDC) Central Training Academy for Safe Driving



Trainees

N = 245

Regular drivers

N = 36

The difference in distribution of the trainees and the regular drivers average deceleration values

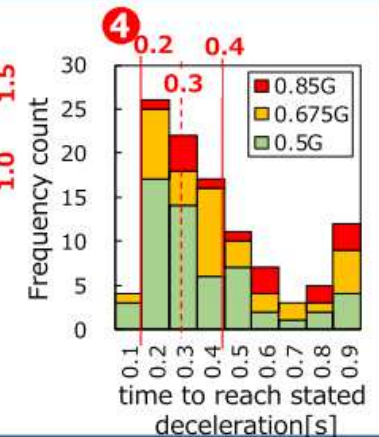
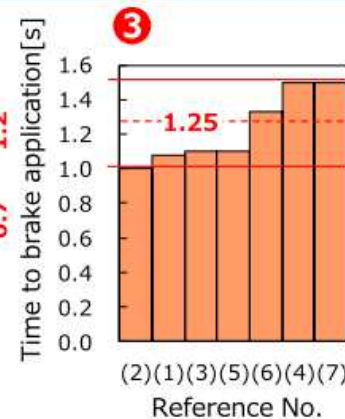
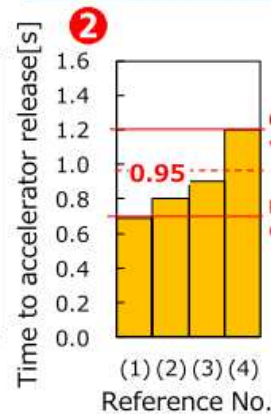
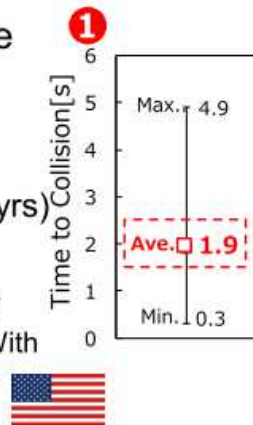
Reference: Makisita et al.(2001)

Evaluation data of attentive drivers

Evaluation subjects:

Average age (35yrs, 18-68 yrs)  
66 Males and 43 Females

Reference: Development of an FCW Algorithm Evaluation Methodology With Evaluation of Three Alert Algorithms (NHTSA June2009)

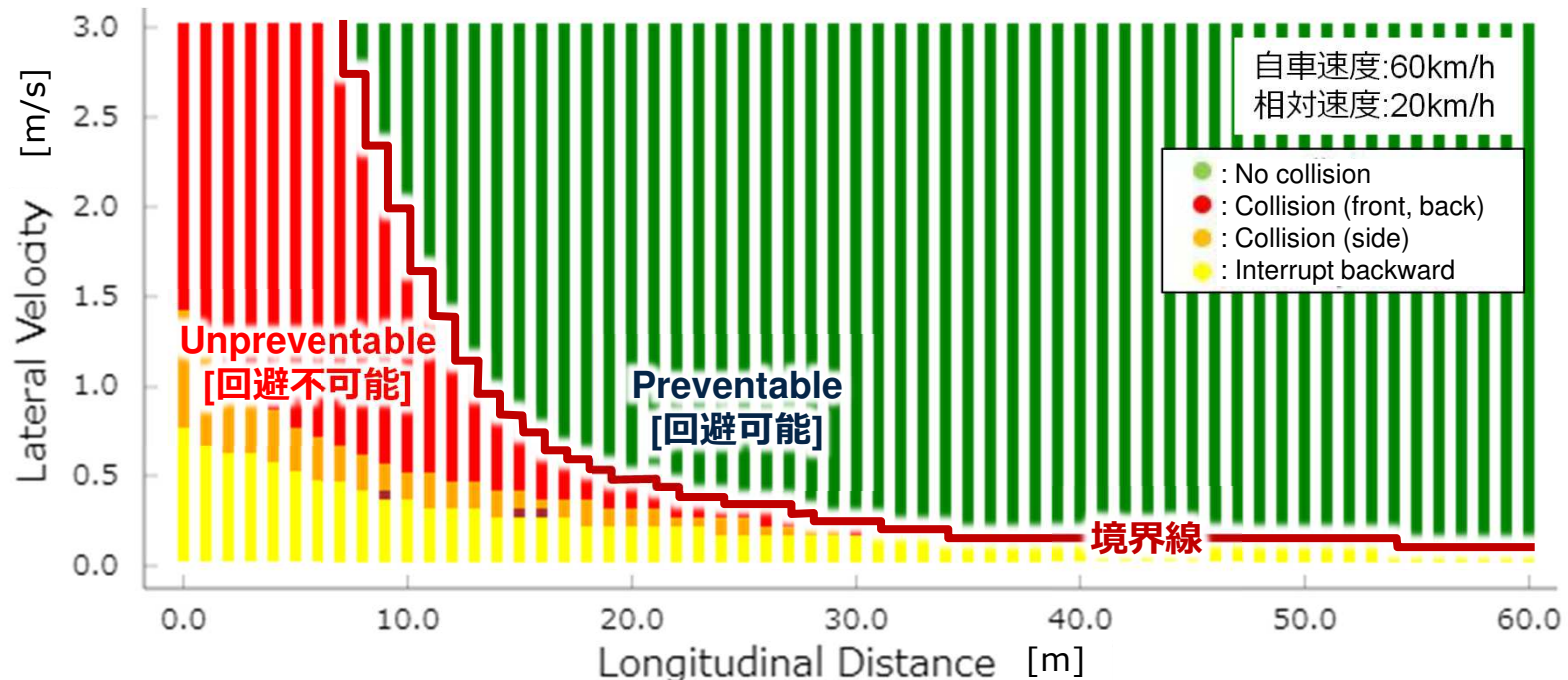


(WP29 GRVA 3rd VMAD IWG: Safety Criteria Study for New Assessment/Test Methods of Automated Driving System)

熟練者のブレーキ操作を表す値を設定し、注意深く有能な運転者を模擬

# 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評価に活用



(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



# SAKURAシナリオデータベース

◆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

Scenario Database

Project: Safety assurance demo UserID: develop SIGN OUT

Vehicle Specifications

Model	2021 Type X
Width	1745mm
Height	1490mm
Wheelbase	4480mm

ALKS

	ScenarioCount	Execution Status	Pass/Fail
> Cutin	TestCase : 10 Scenario : 150	90.0% Executed 10.0% Not Executed	70.0% Pass 30.0% Fail
> Cutout	TestCase : 8 Scenario : 50	90.0% Executed 10.0% Not Executed	70.0% Pass 30.0% Fail
Deceleration	TestCase : 5 Scenario : 5	90.0% Executed 10.0% Not Executed	70.0% Pass 30.0% Fail

Evaluate ALKS Scenario with Driving Intelligence Validation Platform.

EURO NCAP

10 rows | 1-3 of 3

実交通流の実態に即したテストシナリオを出力し、評価結果をフィードバック

# 3. 現在の国際標準化の動向

(ISO3450Xシリーズの動向およびISO21448との関係性)

# ISO3450Xの策定状況

SC33 “Vehicle dynamics and chassis components” 議長・幹事：ドイツ

WG9 “Test scenarios of automated driving systems” コンビナ：中国

ISO番号	標準化テーマ	概要	標準化状況/発行時期		リーダー (サブリーダー)
34501	Vocabulary	安全性検証用のテストシナリオの用語と定義	IS発行	22年10月	中国
34502	Scenario based safety evaluation framework	シナリオベースの安全性評価の枠組み	IS発行	22年11月	日本 (ドイツ)
34503	Taxonomy for operational design domain	運行設計領域の階層的分類と基本要件	IS発行	23年8月	イギリス (日本)
34504	Scenario categorization	テストシナリオの属性とカテゴリ分類	DIS	23年度内 (予定)	オランダ (ドイツ)
34505	Scenario evaluation and test case generation	安全性評価の方法論とテストケース生成手順	WD(3rd)	25年9月 (予定)	中国 ドイツ

(2023年7月時点)

ISO34501～34503まで発行し、現在は34505のドラフト協議中

# ISO34502の策定状況：22/11に発行

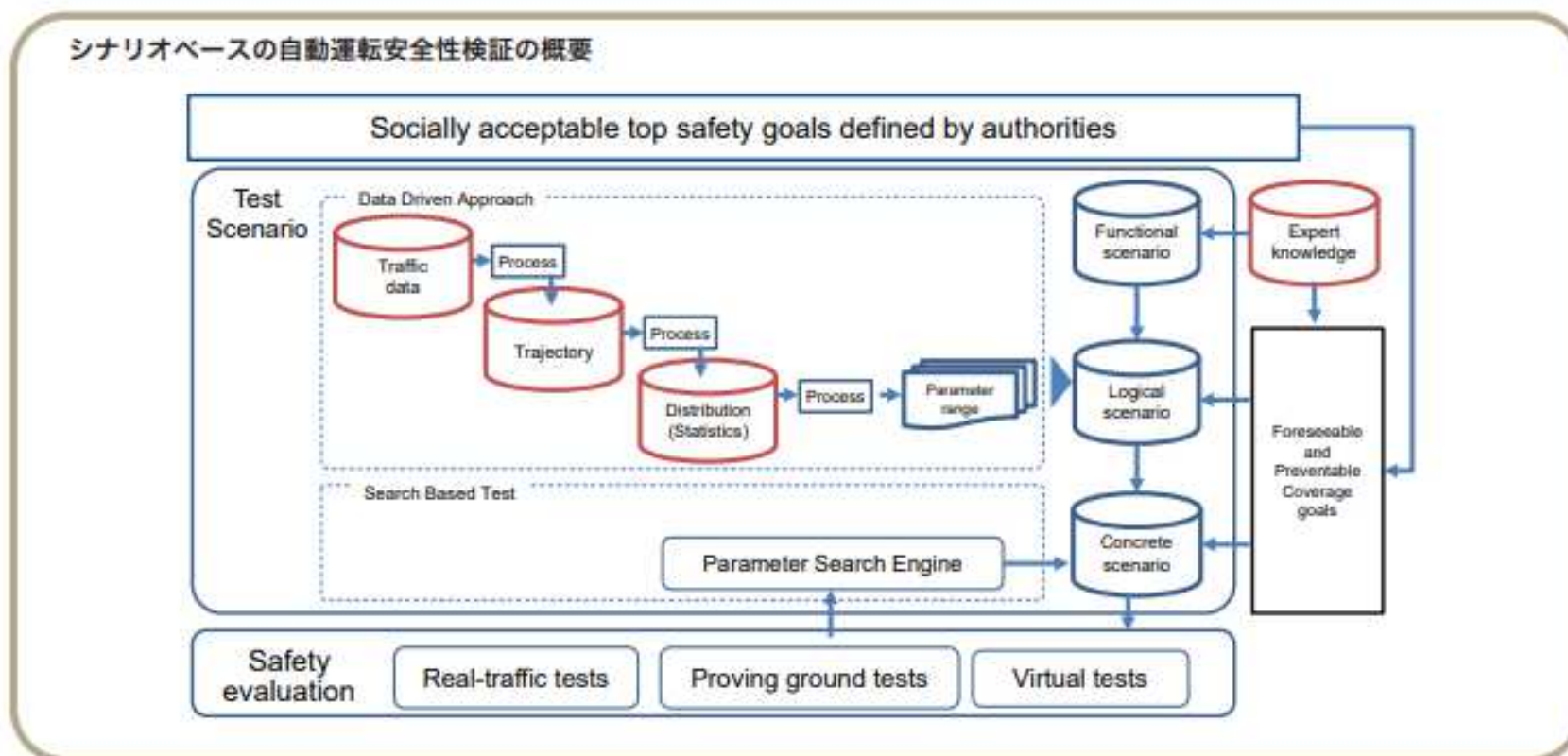
ISO 34502:2022

Road vehicles — Test scenarios for automated driving systems — Scenario based safety evaluation framework

Published  
ISO 34502:2022  
Stage: 60.60

**SC33/WG9(安全性検証シナリオ) 2018年～**

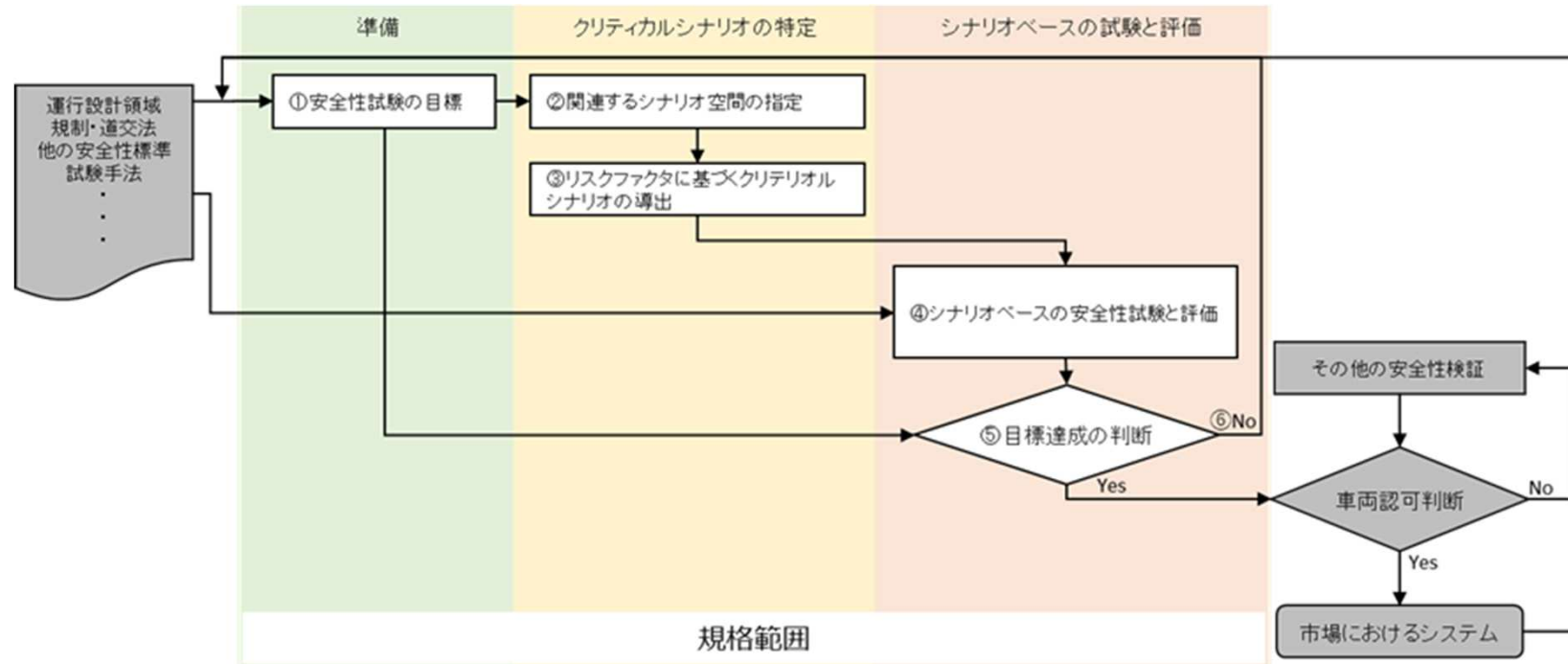
日本は自動運転安全性の国際的な議論をリード





# ISO34502で規定された安全性評価の流れ

## ◆ 自動運転システムの安全目標の達成をシナリオベースの試験と評価で判断

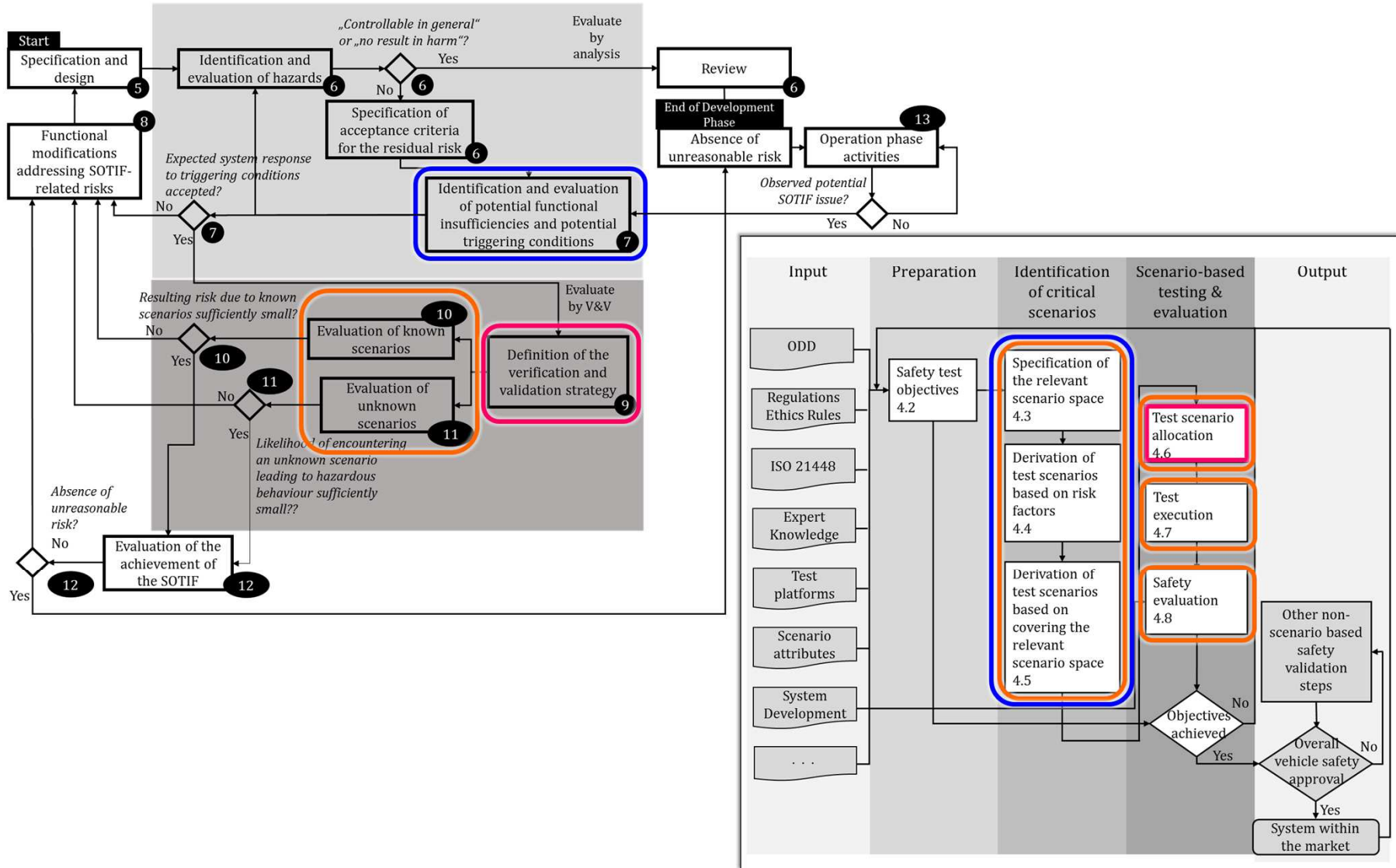


### 【安全性評価の流れ】

- 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など)
- ③ : 危険な事象に至る要因及び②の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
- ⑤ : ①で設定した安全目標を達成しているか判断
- ⑥ : ⑤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

# ISO21448とISO34502の関係性

Figure 3. Relationship between ISO 21448 (left) and ISO 34502 (right) flow charts.



ISO21448(SOTIF)とISO34502は相互に参照する関係

# 国際連携・協調に向けた活動の実施



・シナリオ・論証体系協調



・欧州内の調和動向把握



・シナリオDB協調



・北米論証データ構築



国際学会/会議, bilateral会議などを通して連携・協調を推進

## 4. まとめと今後の取組み



# まとめ

## ➤ 自動運転車に求められる安全性とは

- ・運行設計領域において合理的に予見可能で防止可能な事故が起きないこと
- ・**合理的に予見可能な範囲**と**防止可能な範囲**を定められる手法が必要



### ◆ 合理的に予見可能な範囲を定めること

- ・実交通環境データの分析に基づいて将来起こり得る交通場面の範囲を推測し、**自動運転車の安全性を評価するためのテストシナリオを用意**

### ◆ 防止可能な範囲を定めること

- ・注意深く有能な運転者のブレーキ操作と比べることにより、**自動運転車の衝突回避性能を判断する基準案を用意**

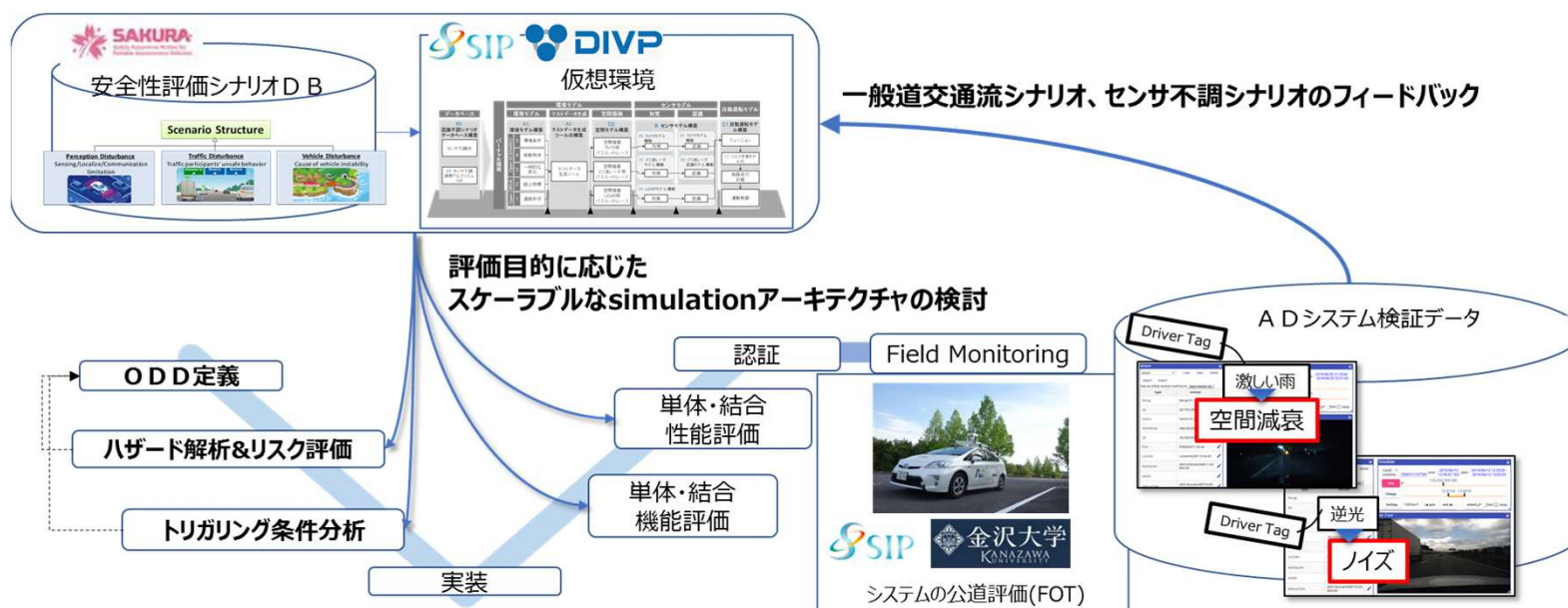
- ・自専道×本線渋滞×車線維持の自動運行装置の国際基準に反映された
- ・機能拡大や一般道へ対応するシナリオ・評価基準を引き続き作成する

# 今後の取組み（2022年度～）

## ➤ 自動運転の安全性評価基盤構築の検討(SIP自動運転と連携)

- ・DIVP(Driving Intelligence Validation Platform), 自動運転技術(L3/L4)に必要な認識技術等に関する研究(AD-URBAN)と連携

### 安全性評価評価基盤



(安全性評価基盤検討合同ワークショップ：自動運転安全性評価合同推進TFの概要)

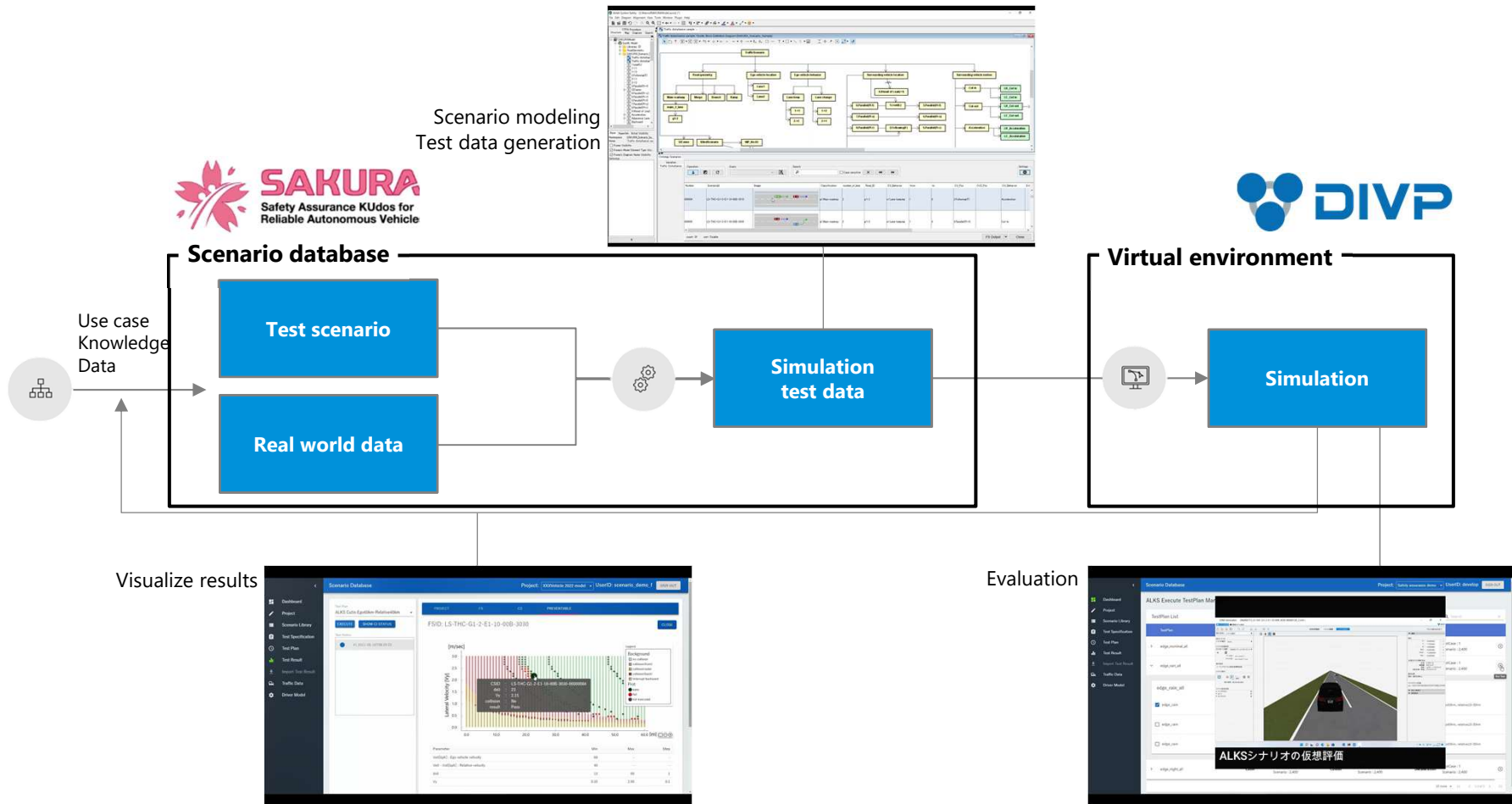
## ➤ 一般道への安全性評価手法の拡張

- ・一般道のシナリオ体系の開発，交差点評価などについて取組みを推進中

国内の関連プロジェクトと連携して安全性評価基盤/手法を開発中

# 【参考】安全性評価基盤の現状

## ◆ 安全性評価評価基盤：SAKURAシナリオDBとDIVP仮想評価環境が結合



(S. Taniguchi: A linked scenario database and virtual environment to enhance automated driving safety and development speed)

網羅的な体系に基づいて生成されるシナリオが循環する評価基盤を構築中

# ご静聴ありがとうございました



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