

Title	交通環境下での運行リスクを低減する自動運転システムのコンセプト定義
Sub Title	Concept definition of an automated driving system that reduces operating risk in a traffic environment
Author	井上, 成実(Inoue, Narizane) 西村, 秀和(Nishimura, Hidekazu)
Publisher	慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科
Publication year	2020
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2020年度システムデザイン・マネジメント学 第409号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	<a href="https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40002001-00002020-0022">https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40002001-00002020-0022</a>

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文

2020 年度

交通環境下での運行リスクを低減する  
自動運転システムのコンセプト定義

井上 成実

(学籍番号 : 81933070)

指導教員 西村 秀和

2021 年 3 月

慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科  
システムデザイン・マネジメント専攻

# 論 文 要 旨

学籍番号	81933070	氏 名	井上 成実
論文題目： 交通環境下での運行リスクを低減する自動運転システムのコンセプト定義			
<p>(内容の要旨)</p> <p>近年、技術の発達によりドライバの運転行為を支援する先進運転支援システム (ADAS: Advanced Driver Assistance System) を搭載した車両が普及し、交通事故の抑制に貢献している。さらに交通事故を減らすことを目的として自動運転レベル3以上の高度運転自動化技術を可能とする自動運転システム(ADS: Automated Driving System)を搭載した自動運転車 (ADV: Automated Driving Vehicle) が社会実装される段階に来ている。ADASのような支援ではなくドライバに代わり運転行為を行うことで交通事故の抑制以外にも少子高齢化によるドライバ不足の解消など多くの社会課題に貢献することをADVは期待されている。</p> <p>ADVが社会から受容され存在を認められて普及するためには、ADVの周辺の交通参加者の安全が確保されるばかりでなく、ADVの振る舞いにより周辺の交通参加者が危険を感じないようにする必要があると考えられる。これまでの関連研究では、ADSまたはADAS搭載車両自身のリスクを下げることを目的に危険を回避することに焦点を当てている研究が多いが、周辺の交通参加者が感じるリスクを明確に評価し、これを低減するための研究は見当たらない。</p> <p>本研究では、ADSが周辺車両の運転レベルの評価を行い、運転レベルが低く危険源となり得る周辺車両から許容できるリスクに低減する距離を保つ方法を提案する。これにより、リスク上昇につながる交通環境の変化が発生した場合にも、自車両自身の安全を確保した上で、周辺車両のドライバへ与えるリスク感を低く保つことが可能となる。この評価には、ADASによる衝突回避の先行研究で提案されたRF(Risk Feeling)を用いている。周辺車両の運転レベルの評価には、周辺の交通環境を把握した上で、自車両と各交通参加者の状態から評価したリスクを本研究で提案するPotential Risk Area of the Vehicle(PRAV)コンセプトに反映している。そして、周辺車のリスク評価を行った上で、その評価結果に応じてADSが自車両を操作するものとする。PRAVコンセプトの効果についてFTA(Fault Tree Analysis)を用いて検証している。</p>			
キーワード (5語) ADV (Automated Driving Vehicle)、ADS (Automated Driving System)、交通参加者、社会受容性、リスク評価			

## SUMMARY OF MASTER'S DISSERTATION

Student Identification Number	81933070	Name	Narizane Inoue
Title Concept Definition of an Automated Driving System that Reduces Operating Risk in a Traffic Environment			
Abstract <p>At present, Automated driving vehicles (ADV) equipped with Level 3 or higher Automated driving systems (ADS) that take over for the driver are at the stage of being implemented in society.</p> <p>In order for ADV to be accepted by society and to spread their existence, it is necessary to ensure the safety of traffic participants in the vicinity of the ADV, and to ensure that traffic participants in the vicinity do not feel any danger due to the behavior of the ADV. Although previous related studies have aimed to reduce the vehicle risk of ADS or ADAS (Advanced driver-assistance systems) equipped vehicles by avoiding hazards, there are no studies that have clearly evaluated the risk reduction of traffic participants in the vicinity.</p> <p>I In this study, we propose a method for ADS to evaluate the driving level of surrounding vehicles and determine the distance to be reduced to an acceptable risk from surrounding vehicles that have a low driving level and may be a source of danger.</p> <p>in this way, it will be possible to maintain a low sense of risk to the driver of the surrounding vehicle even when changes in the traffic environment that lead to increased risk occur. For this evaluation, we use Risk Feeling (RF), which has been proposed in previous research on collision avoidance by ADAS. For the evaluation of the driving level of the surrounding vehicles, the risk evaluated from the status of the own vehicle and each traffic participant is reflected in the Potential Risk Area of the Vehicle (PRAV), based on the understanding of the surrounding traffic environment. The effectiveness of the PRAV concept was verified using FTA (Fault Tree Analysis).</p>			
Key Word(5 words) Automated Driving Vehicle, Automated Driving System, Traffic Participants, Risk Assessment, Social Acceptability			

## 内容

第1章	緒言	5
1.1	研究の背景	5
1.2	先行研究と特許	12
1.3	研究の目的	15
1.4	本論文の構成	15
第2章	自動運転のリスク評価	16
第3章	周辺車両のリスク低減を考慮した ADS コンセプトの提案	17
3.1	自動運転システムの基本アーキテクチャの定義	17
3.2	周辺車両のリスク低減を考慮した ADS コンセプトの提案	29
3.2.1	ドライバが行う「予測」について	29
3.2.2	コンセプトの狙い	34
3.2.3	提案するコンセプト (PRAV コンセプト)	41
3.2.4	事前準備 (周辺車両の運転評価と事前の走行フォーメーションの決定)	44
3.2.5	シナリオの設定と PRAV 完成予想図	46
第4章	評価 (リスク低減効果)	52
4.1	車両 A 後方の PRAV 評価 (シナリオ 1)	52
4.1.1	障害物出現に対する EVD のリスク感の低減	54
4.1.2	後続車両のドライバに対するリスク低減の配慮	57
4.1.3	車両 A の後方 PRAV の算出式の導出	61
4.2	車両 A サイドの PRAV 評価 (シナリオ 2)	64
4.3	車両 A の斜め後方の PRAV 評価 (シナリオ 3)	65
4.3.1	前方に現れた車両 A に対する EVD のリスク低減	68
4.3.2	後続車両のドライバに対するリスク低減の配慮	71
4.3.3	車両 A の斜め後方 PRAV の算出式の導出	77
4.4	車両 A 前方の PRAV 評価 (シナリオ 4)	80
4.4.1	MRM を発動した EV の後続車のリスク低減	82
4.5	FTA による本コンセプトの効果確認	87
第5章	結論	89
	謝辞	91
	参考文献	92

# 第1章 緒言

## 1.1 研究の背景

近年、技術の発達によりドライバの運転行為を支援する先進運転支援システム(以下、ADAS: Advanced Driver Assistance System)を搭載した車両が普及し、交通事故の抑制に貢献しており、同機能を搭載しない車両に対して人身事故発生件数が6割低減しているとする報告がある [1] [2]。今後は技術の発達により、運転行為をドライバに代わって行うレベル3以上の運転自動化技術を搭載した車両(ADV: Automated Driving Vehicle)が社会に出るとされ [3] [4] [5] [6]、日本国内企業が2020年度内の日本国内発売を予定している [7]。本章では自動運転の定義を確認し、自動運転車が社会から期待される役割とその課題を述べる。

レベル3自動運転について2020年6月に国際基準が成立し・自動車専用道路上・車速60km/h以下・前走車あり・同一車線内という条件について規定が決められた。この条件においてドライバはステアリング操作不要(Hands Off)、及び、周辺監視不要(Eyes Off)となり、運転行為から解放されることになる。ただし、ドライバは自動運転走行が出来ない場合の運転交代要員としての機能を有することになり、ADSから運転交代要求(RTI: Request To Intervene)が出された場合に応答しなくてはならず、居眠り等の行為が許されることはない。

今後は技術の高度化によるレベル3自動運転車の一般化、レベル4,5自動運転車の実用化が見込まれている [4]。この背景には社会からのニーズがある。社会が自動運転車に求める役割として交通事故削減があげられる。

警視庁交通局の統計データ [8]によると2010年から2020年までの近年10年間に交通事故死者数は4948人から2839人へと43%低減している。そして、2020年度から市場へ出るレベル3をさらなる低減への貢献が自動運転に期待されている [4]、この期待に応じて自動車製造事業者各社は2030年までの「交通事故死者数ゼロ」、「交通事故ゼロ社会実現をリードする存在になる」などの目標を打ち出している [9] [10]。

他、交通渋滞の緩和、物流交通の効率化、高齢者等の移動支援、等、多くの社会問題解決への貢献が期待されている。

自動運転の定義について述べる。自動運転に関してはシステムがどの程度、動的運転タスク(以下、DDT: Dynamic Driving Task)に介入するかの度合いによる分類がレベルとして定義されており、全てのDDTをドライバが行うレベル0から全てをシステムが行うレベルまでの6つに分類される。Table.1は自動運転車の安全技術ガイドライン [3]に記載された自動運転レベルの概要である。これは文献 [11] [12]を元に作成されたもので、国際的な規格に準拠している。

ここで、レベル0~2と3~5で大きく区別される。この違いはレベル0~2はDDTを実行中について、安全に係る監視と対応の主体の役責がドライバにあるのに対して、レベル3以上では条件や領域が限定される場合を含み、その役責がシステムにあることである。レベル3以上では車両に搭載された自動運転システム(以下、ADS: Automated Driving System)がそれを行う。本研究においては、文献 [11] [12]に基づいて以下のよう

自動運転システム: レベル3~5の運転を行うシステムを指し、ADSの略語を使う。

緊急回避能力及びADASが持つ能力(先行車追従、レーンキープ能力等)は自動運転システムの機能の一部とする。

自動運転車とはADSを搭載した車両を指し、本論文ではADV(Automated Driving

Vehicle) の略語を用いる。

**Table. 1 自動運転化レベルの定義の概要 [3]**

レベル	名称	定義概要	安全運転に係る監視、対応主体
運転者が一部又は全ての動的運転タスクを実行			
0	運転自動化なし	運転者が全ての動的運転タスクを実行	運転者
1	運転支援	システムが縦方向又は横方向のいずれかの車両運動制御のサブタスクを限定領域において実行	運転者
2	部分運転自動化	システムが縦方向及び横方向両方の車両運動制御のサブタスクを限定領域において実行	運転者
自動運転システムが（作動時は）全ての運転タスクを実行			
3	条件付き運転自動化	システムが <b>全ての動的タスクを限定領域（運行設計領域ODD）において実行</b> 作動継続が困難な場合は、システムの介入要求などに適切に応答	システム（作動継続が困難な場合は運転者）
4	高度運転自動化	システムが全ての動的運転タスク及び作動継続が困難な場合への応答を限定領域において実行	システム
5	完全運転自動化	システムが全ての動的運転タスク及び作動継続が困難な場合への応答を無制限に（すなわち、限定領域内ではない）実行	システム

ADV が期待される役割を果たすためには、社会から受容され、存在を認められなければならない。そのためには危険な存在ではないことを周囲に認知される必要があり、ADV が走行する周囲の交通参加者にとって許容しがたいリスクとなってはならず、それは、通常状態で自動運転走行しているときだけでなく、異常が生じて自動運転走行の継続が困難な場合においても守られる必要がある。

ODD と異常発生時危険回避機能 (MRM: Minimum Risk Maneuver) について述べる。

国土交通省 自動運転車の安全技術ガイドライン [3]において、レベル3,4自動運転が満たすべき車両安全の定義を次のように定めている。

「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」 そのための要件としてのODDの設定、ADSの安全性についての記述が続く。

ODDの設定については、「レベル3以上の高度な自動運転システムは未だ開発段階の技術であり、あらゆる道路環境や気象条件などで自動運転車が完全に安全な走行が行える技術水準に至っていない、このため、個々の自動運転車が有する性能及び使用の様態に応じた運行設計領域(ODD)を定め、走行環境や運用方法を制限し、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を確保する必要がある。」とあり、レベル3,4自動運転は技術的な理由により、自動運転走行出来る条件が制限されることを示している。ODDについては自動運転システムが機能する特定の条件を規定するものとして、道路条件（高速道路、一般道、車線数、車線の有無、自動運転車の専用道路 等）、地理条件（都市部、山間部、ジオフェンスの設定 等）、環境条件（天候、夜間制限 等）、その他の条件（速度制限、信号情報 等のインフラ協調の要否、特定された経路のみの運行に限定すること、保安乗員の乗車要否 等）が例としてあげられている。

ODDについては”ODD Classification Framework With Top-Level Categories and Immediate Subcategories”として、A Framework for Automated Driving System Testable Cases and Scenarios (NHTSA) [13]に詳細に記載されている。

ODDがこのように設定されるのはADSが自動運転を行う上で、技術的な問題により多くの考慮すべき制約があることを示している。

先の章で述べた、2020年にレベル3自動運転車の使用場所として国際基準となった、「自動車専用道路上、同一車線内、車速60km/h以下、前走車あり」という条件もODDの一部である。

Minimal Risk Maneuver(MRM)について述べる。レベル3,4 ADSが技術的発展の問題からODDの設定が必要であり、レベル3,4 ADSはODDの範囲内でのみレベル3,4 自動運転を行うことが可能であることを先に述べた。つまり、ODDの範囲外ではレベル3,4の自動運転を行うことが出来ない。ADVがODDを外れる場合には、走行モードをレベル3,4 自動運転からレベル3未満の走行モードへ移行させなくてはならない。先のガイドライン [3]では「自動運転システムの安全性」として、ADVがODDの範囲外となった場合や、イレギュラーなことが生じた場合について以下のように規定している。

「設定された ODD の範囲外となった場合（範囲外となりそうな場合を含む）や自動運転車に障害が発生した場合等、自動運転の継続が困難となった場合には、最終的に車両を自動で安全に停止させることが必要である。」



ODDを外れて自動運転の継続が困難となりそうな場合に車両を自動で安全に停止させることを目的としてADSに設定を義務づけているのがMRMである。

レベル3ではODDを外れる、または、外れそうな場合に、ADSはドライバに運転交代を要求する(RTI)。ドライバがこれに応じない場合に事故発生リスクを最小限に抑えて、車両を自動で安全に停止させるMRMを作動させる。レベル4 ADSの場合は、ODD範囲内での使用において、かつ、ドライバがいないことが前提であるためRTIは不要となる。MRMが作動する状況と考えた場合、自動運転モードでの走行が困難な状況において、ADVは周囲の車両など交通参加者に危険を与えないよう、交通事故を誘発せずに動作しなければならず、技術的難易度が高いことが考えられる。

※MRM については国土交通省ガイドライン [3]では“MRM(ミニマル・リスク・マヌーバー)”、NHTSA(National Highway Traffic Safety Administration) [13]では”Minimal Risk Maneuver”、国連の自動車基準調和世界フォーラム(WP.29)では“Minimum Risk Manoeuvre(MRM)” [14]、という言葉がそれぞれ使われて言及されている。

MRM の動作について述べる。文献 [11] [14] [15]を参考に MRM の動作の一例を Fig.1 に示した。レベル3 自動運転車を想定したものである。ADSはADVがODD範囲内で走行する場合に、ドライバの意志によりレベル3の自動運転走行を行う。自動運転モードで走行中、ODDを外れるトリガイイベントが発生する。トリガイイベントにより、ODDを外れつつある、または、ODDを外れたADVは搭載されたADSがドライバに対して運転交代要求を行い (RTI : Request to Intervene)、減速 (減速度  $|4 \text{ m/s}^2|$  以下)を開始し、一定時間、ドライバの反応がない場合はより高い減速度で強い制動を行い、車両を同一者線内に停止させる。

ガイドライン [3]において、ADSがMRMを実行する場合として「ODDを外れる/外れそう」以外に、「ADSに障害が生じた場合」、「その他の理由でADSが自動運転継続を困難と判断した場合など」とある。これらの場合にRTIをドライバへ発信し応答がない場合にADSはMRMを作動指せる。Fig.4では通常のレベル3自動運転走行状態からドライバへRTIを要するトリガイイベントが発生し、MRMを行うまで流れを図示した。

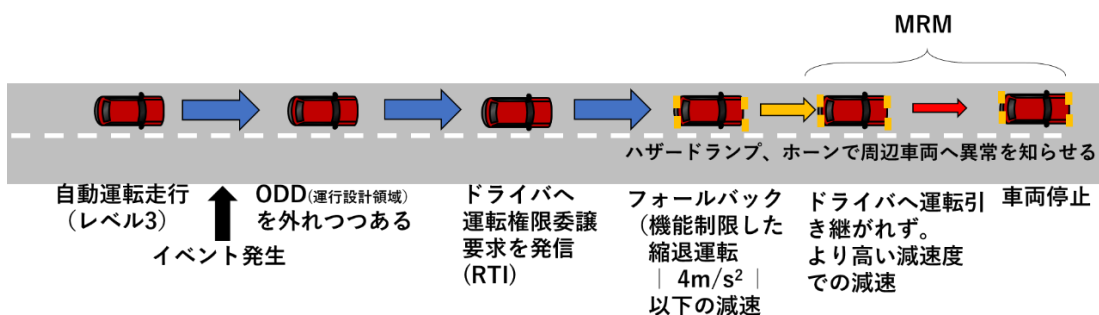


Fig. 1 MRM の動作の一例

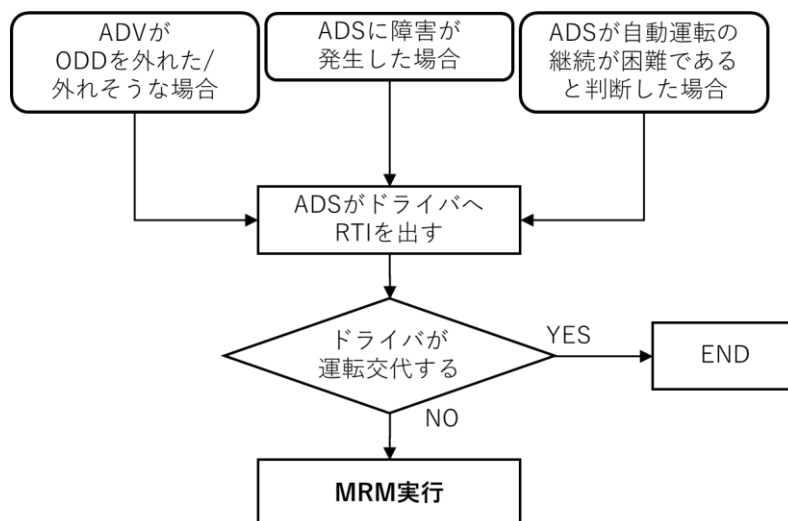


Fig. 2 MRM への移行フロー

自動車基準調和世界フォーラム(WP.29)レポート ECE/TRANS/WP.29/2020/81 [14] 第5章においてMRMの動作について以下のように記述している。

以下 WP.29 レポートにあるMRM動作についての記述（原本を筆者により和訳したもの）

(5.5.1)

- 同一車線内で減速、または、車線が見えない場合は周囲の道路状況と道路インフラを考慮して適切な軌道に残ること。減速度は  $4 \text{ m/s}^2$  以下であること。
- ドライバの注意を促すためや深刻なALKSや車両の故障の場合により急激な減速がごく短時間において許容される。  
※ALKS: Auto Lane Keeping System（同一車線内走行維持システム）
- MRMの開始と同時にハザードランプを作動させなければならない

(5.5.2)

- MRMはドライバーがキャンセルしない限り車両を停止させる。

以上

Fig.1は同一車線内を減速して停止する「減速停止型」について表したものであるが、さらに国土交通省ガイドライン [3]では、MRMの動作について次のように記載している。

- 車両を路肩等の安全な場所に自動で移動して停止させることが望ましい。
- 自動運転車のMRMの設定は、周囲への警報を行いつつ、車線を維持、又は車線を変更しながら自動で安全に停止させる措置が想定されるが、今後の技術開発の動向及び国際的な基準の検討状況を踏まえ具体的要件を検討する。

2018年に発行された国土交通省ガイドライン [3]には上記のように車線変更を伴うMRMについて示唆されているが、レベル3自動運転装置の国際基準が2020年6月に成立し、これに関係するWP.29の提案書 [14]には車線変更を伴うMRMについての記述はない。しかし、国土交通省が自動運転とは関係せずに発行した、「ドライバー異常時対応システム」の基本設計書 [16] [17]には「減速停止型」の他に「路肩退避型」について記載がある。

MRM 実行については ADS による自動運転が困難である場合において、車両を安全に停止させることが求められている点で技術的難易度が高い場合があると推察する。例として、車両が悪天候などで搭載された外界検知用センサが使えなくなった場合を想定すると、路面の白線を検知するカメラが使用出来ない場合、同一車線内で停止するという行為をカーブ中で行うことは難しいことが予想される。

ドライバが通常状態で車両を運転する上で、緊急回避を要する場合がある。代表的なシーンとしては、日常的に起こりうるものとして前方車両への追突の恐れが生じる場面がある。また、道路上の落下物をよける場面も考えられる。レベル 3,4 自動運転走行中の ADV はこれらの場面においてもレベル 3 自動運転の動作としてこの状況に対処する必要がある。

自動運転技術は開発段階にあるために ADV が単独で実現できる安全、つまり、他の交通参加者にとって許容しがたいリスクとならないための振る舞いを広い行動範囲において実現することは難しいことが考えられる。このために、2020 年の段階ではレベル 3 自動運転車の公道での使用のための国際基準は実質的に自動車専用道路上における渋滞中での使用に範囲を限り成立した [14]。しかし、これでは ADV は社会からの期待に十分に答えられるとは言い難い。

ADV 単独での安全確保に限界があることは従来から課題意識が持たれてきた。これを解決しようとする技術開発が行われており、これを紹介する。通信を使用したものであり、V2X という略称で呼ばれることが多い。V は Vehicle、2 は to、X は Vehicle が通信する相手を示し、インフラなど様々なものが考えられている。以下は文献 [18] [19] を参考に記載する。

1) 車車間通信 (V2V : Vehicle to Vehicle) : 路上を走行する車両間で行う通信システム  
車同士がお互いの存在、位置情報、速度情報等をやりとりすることで協調制御する。

2) 路車間通信 (V2I : Vehicle to Infrastructure) : 車両と道路インフラとの通信システム

V2R(Vehicle to Road)を含む。

道路側から信号情報などの道路情報を車両が入手し安全運転に活用する。

3) 歩車間通信 (V2P: Vehicle to Pedestrian) : 車両と歩行者との通信システム  
歩行者の存在情報を車両が取り込み、出会い頭の歩行者との衝突を防ぐ

4) 車とネットワーク通信(V2N:Vehicle to Network) :  
車両とクラウドとの通信システム

車両へより遠方の道路状況を伝えることで安全制御に役立つことが期待される。通信対象に N が入ることで、V2N2V、I2N2V といった、車両同士、車両と道路インフラとの通信を補間でき、データを車両、道路インフラの情報をクラウドからよりデータを必要とする、より遠くの場所で活用することが可能となり、車両の遠隔制御による緊急停止などの実施を行えるとし、2025 年頃に限定地域でのレベル 4 自動運転車への応用が期待される。

これらは車両に搭載されるカメラやセンサなどの認識技術の限界を補うだけでなく、強化して、ADV のより安全な有効活用に役立つことが期待できるが、まだ、実用化への道のりが遠いのが現実である。

車車間通信は自車と他車の両方に通信機器が搭載される必要があるが現状では一般的に普及していない。

路車間通信については経済産業省と国土交通省の自動走行ビジネス検討会レポート[20]によると、レベル3,4の自動運転に最低限必要な通信インフラの要件と、認知・判断技術の要件の見極めについて2020年度末をめどに行うとしており、このときにインフラの整備コストと技術開発の必要性のバランスが考慮される。今後、どの程度までの普及と利用を目指すのかも含めて検討を要するものである。2025年3月頃に特定地域内での試験運用を行った後に2030年頃までに安全性評価を行うとしており、実用化は当然、先のこととなる。

車両とネットワークとの通信システムも路車間通信と同様の動きで2025年頃の特定地域内に限定して、また、通信対象としてレベル4自動運転車を想定していることから、これもまた同様に実用化は先の話である。

レベル3のADVが社会で実用化され始めようとする状況において、ADVが将来的に期待される役割を果たせるよう、社会から存在を認められ受け入れられて、普及するために、周辺の交通参加者にとって、許容不可の危険源とならないようにADVが振る舞うことが必要であり、MRM作動や、突然の交通状況の変化における危険回避行動が必要とされる場合においてもこれを可能とする研究が求められる。

かつ、前提としてV2X等の現時点で、実用化、普及が見込めない技術やシステムを使用せずに行う必要がある。

## 1.2 先行研究と特許

### ● 先行研究

ADV 及び、ADAS 搭載車の安全な振る舞いについての研究を以下に紹介する。

Donghoon Shin [21]らは V2V とレーダを融合したシステムを提案し、高速道路でのカットイン車両への回避行動について検証し、レーダのみをセンシングに使用した場合と比較して、提案システムでは V2V により検知対象の車両からの情報が早く得られることで、より早期から穏やかにブレーキをかけることができるために、危険回避行動の交通の流れに対しての影響が最小になるとしている。また、Xu, Qing ら [22]は車車間通信(V2V)、路車間通信(V2R)の効果を検証した。これらは V2X の利用の効果を示すものである。

ポンサントーンの研究 [23]は衝突危険度を予測したドライバの行動を表現する“自律運転知能システムのドライバモデル”を作成したものである。ドライバが交通状況に応じて潜在的な危険予知による判断をおこなうものを制御で実現し、ADAS へ組み込むことを目的としている。研究では駐車車両の陰から歩行者が突然飛び出す状況を想定し、モデルから求めたリスクポテンシャルから導出した走行軌跡と速度が熟練ドライバによる運転行動を精度良く再現しているとした。これは V2X を使用せず、すでに広く実用化されているカメラ、レーダなどの既存の車両搭載外界検知センサの利用で実現可能であること、また、熟練ドライバの危険予知行動の一部を再現している点で興味深い。

古賀あやめら [24]は運転個性を反映したモデル予測型自動運転システムの提案を行っている。これは、人間のドライバが状況の観測や自らの経験、勘に基づいて自車両の挙動を予測しつつ、操作量を決定していることを自動運転システムに反映するためのもので、自車両がスムーズに運転を行うことを目的とし、予測による危険回避を目的としたものではない。

橋本康平らの研究 [25]では一般的に熟練運転者が視覚情報だけでなく、起こりうる事象の知識や過去の経験に基づいて高度な危険予測と運転行動の意志決定を行うとし、自動運転のための“危険予測したうえで運転行動の意志決定を行うシステム”を危険予知システムとして、これを推論の根拠を提示可能な論理知識型 AI に基づいて構築することを提案した。自動運転車が万が一の意志決定ミスによって事故を起こした際に、自動運転車に人工知能がその意志決定に至った根拠の説明を求められた際にそれを説明可能な手法として論理知識型 AI を選択している。この研究ではシステムの提案をしており、熟練ドライバのどのような運転を自動運転車に搭載するかを論じるものではない。

ポンサントーンの研究 [23]は、文献中に記述があるように、「数秒先の運転状況を先読みする」ことを目的としている。数秒先を予測することは危険回避において有効と考えられるが、筆者の経験では熟練ドライバは事前に周囲の道路状況を把握してリスクの発生要因となるものに近づかないように配慮することで不測の事態が生じた時により穏やかに対処する事もあると考える。そして、より距離的に遠くにある、また、より長い時間の先に起こりえる危険を予測して対処する、または、危険となるイベントの発生を防ぐことを可能とさえする技術が V2X と考えるが、これは多くの企業でユースケースを設定し実証実験を行っている段階であり [26] [27]、一般に普及はしていない。

木下の研究 [28]は自動運転車及びそれに関わる周辺システムを「自動運転車を取り巻く System of Systems」と定義し、自動運転車が導入された交通環境の安全の実現を目的として行われている。ここでは自動運転車が交通参加者に対して設定する優先度に関する抽象的な約定に沿って振る舞うことが System of Systems(SoS)の安全の確保のために重要であることを SoS アーキテクチャに基づいて導いている。

本間ら [29]は MRM を行う自動運転車が後続車へ与える影響をドライビングシミュレータ(DS)試験で評価しており、減速停止、及び、路肩退避を行う場合について後続車

のドライバーがもつ不快感から衝突リスクが比較的高い条件では後続車両のドライバーからの受容性も低く評価される傾向であることを求め、望ましい MRM の条件を論じている。

岸川ら [30]は事故を起こさず安全であることに加えて、自動運転車の搭乗者にとって不快感を与えない走行を「安心走行」と定義し、深層強化学習によって安心走行を獲得する手法を提案している。

松下ら [31]は前方視野の危機感に基づくドライバーモデルの自動運転制御への応用としてシステムの認知・判断のプロセスを模範的な運転としてドライバーに示すことでドライバーの安全意識、安全基準の向上を実現し、ドライバー自身が運転する際の安全運転の実現を想定している。この研究における危機感とは自動運転車のドライバーのものである。

米陀ら [32]は自動運転システム用のレーンチェンジ計画として熟練ドライバーのレーンチェンジ軌跡を評価してこれと比較してなめらかな走行軌跡を得られるレーンチェンジモデルを提案している。周辺車両の観測・走行軌跡の予測による衝突判定を行い走行軌跡を評価するものである。

金子ら [33]も自律走行車両のステアリング制御に着目した研究を行っている。大型貨物車を対象として、障害物回避時の人間の運転動作を基本とした危険感ポテンシャルドライバーモデルと車両運動性能を考慮した車両モデルを用いた制御目標生成アルゴリズムの提案について、熟練ドライバーによる実車走行実験データと同様の走行環境から生成された制御目標との比較検証を行っている。危険感ポテンシャルは自車両ドライバーのものについて考慮されたものである。

他にも自車両のドライバーの状態、とりわけ視線をモニタリングすることにより危険な運転が行われることを未然に防ぐことを目的とした研究がなされている [34] [35]。

Deo ら [36]は自車両の行動計画について、車両に搭載したセンサで周辺車両の動きを予測する FRAME WORK の提案を行っており、自車両のドライバーと他の交通参加者の安全に配慮した自車両の運転を実現しようとするものである。

平岡らの研究 [37] [38]では、歩行者を検知してその検知性能を示す検知率が運転行動に与える影響について検証を行っている。

Mobileye の Shwartz ら [39]は Responsibility Sensitive Safety(RSS)と名付けたモデルを提唱している。これは従来の機能安全(ISO26262)による手法では自動運転車両を取り巻く様々なケースでの交通環境の安全を確保することは難しいという考えに基づいているものである。現実の交通環境では自動運転車両が事故に巻き込まれないことを保証できず、事故の発生源にならないことを目的としている。RSS は「後ろから衝突しないこと」「無謀なカットインをしないこと」「道を譲ること」「視界の悪い場所は注意を払うこと」「避けられる事故は避けること」を常識的なルールとして形式化し、シナリオを提示してモデル化を行っているものである。

## ● 特許

本研究では熟練ドライバーが行う危険予知と回避の方法として、周辺車両の運転のレベルを評価し、リスク源となり得る車両には近づかない等の対処を行い、これを ADV の危険回避行動へ取り込むことを考える。これと類似の手法が特許として出願されている。

ソニー株式会社の特許 [40]は以下の内容である。  
周辺車両の運転レベルの評価を自車両のドライバーまたは、車両に搭載したカメラなどのセンサ類により行う。このデータは評価された運転者、車両と評価結果を ID で連結させてデータサーバに格納される。データサーバには過去に評価された運転者の運転傾向を示すデータが車両情報とともに蓄積される。そしてこのデータは利用者に提供され、自車両を運転中のドライバーは周辺を走行する車両について、それが危険な運転を行うド

ライバが運転する車両であるかを知ることが出来、それにより利用者であるドライバは危険運転を行うようなドライバが運転する周辺車両からは車間距離を長めに設定する、近づかないなどの運転上の配慮を自ら行うことが出来るというものである。

この特許が解決しようとするのはドライバの運転特性を保険料の算出に利用する「運転行動型テレマティクス保険」での困りごとである。これがこの特許を特徴づけている。このタイプの保険はドライバの運転を評価して急ブレーキ、急発進、急ハンドルを多用するドライバについては危険な運転が多いとして保険料が高く算出されてしまうが、緊急回避行動のための急操作は妥当なものであり、不当に保険料が高く算出される可能性があるため、単に急操作の頻度の高さで評価するのではなく、他者による運転評価を用いようとするものである。このため、この特許ではデータサーバへデータを蓄積し、これを用いることを前提としている。保険契約者など、データサーバのデータを利用する権利を保有する者がシステムを利用出来ること前提としていると考える。つまり、この特許に書かれたシステムにはデータサーバや車両とサーバをつなぐ通信などが必要であり、車両単独で成立させるものではない。その一方で、車両側には特別な外界検知センサやADS,ADASを必要ともしないことは長所となり得る。他車の運転評価のためのカメラが必要なら、すでに存在するようにドライブレコーダ等を保険契約者に提供する方法を取ることも可能であろう。

#### ● 先行研究のまとめ

前走車へのリスクを評価した研究、一般的に実用化していないV2Xの有用性を示す研究が多数あり、自動運転車が事故を起こさないよう、搭乗者のリスクを評価して熟練ドライバの様になめらかで安全な運転を行うことを目的としたものがある。また、AIを用いた研究もあるが、走行中の周辺車両に自車両が及ぼすリスクを評価し、これを低減することを目的とした研究は見当たらない。また、ソニー株式会社の特許については周辺車両に対しての運転レベルの評価結果を利用して危険な車両に近づかないようにするものであるが、大型サーバへデータを蓄積してテレマティクス保険契約などでデータ利用権限が付与された利用者による利用が前提とされており、車両搭載システムで完結せず、この制限により自動運転車両のどれかが利用可能となるものではない。

Shwartzの研究[39]は単純なシナリオを設定してモデル化するという手法をとっており、そしてまた、周辺車両のドライバが感じるリスクを定量化しているものではない。

### 1.3 研究の目的

本研究はADVが期待される役割を果たすためには社会から存在を受容される必要があり、そのためにはMRM動作時や交通環境の急変などによる緊急事態において危険回避行動を行う場合も、ADVの振る舞いが周辺車両へ及ぼすリスクを抑えることは重要と捉えて、周辺の交通参加参加者の安全を確保し、受けるリスクを低減することを目的とする。

そのために、それらのリスクを評価するための指針を検討し、リスクを最小にする振る舞いの検討から、ADSのコンセプトを定義する。

### 1.4 本論文の構成

第1章では高度自動運転技術によるレベル3自動運転車がいよいよ実用化目前にある現状を伝え、自動運転技術の自動化レベルの定義、実用化のために発行された国際基準を紹介し、自動運転技術が未だ開発段階にあること、自動運転がODD設定範囲に限られ、そのために、自動運転継続不可となる場合のMRM他の危険回避を行う必要があること、自動運転車の社会受容のためにそれを周辺の交通参加者にとって、許容されないリスク源とならないようにする必要があること、先行研究を持ってして課題が存在することと共に本研究の目的を伝えた。

第2章ではリスクを評価するための指標を伝える。

第3章では本研究における自動運転搭載車の自動運転システムのアーキテクチャを定義し、本研究で提案するADSコンセプトについて説明する。

第4章ではADSコンセプトの有効性をリスク評価指標により評価し、

第5章で総括する。



## 第2章 自動運転のリスク評価

これまでの衝突軽減ブレーキ(AEB:Auto Emergency Brake)、あるいはADASの関連研究では、主に、先行車への接近を想定したリスク評価の研究が数多くなされてきている [41] [42] [43] [44] [45] [46]。

この中では先行車に衝突するリスクを後続車である自車のドライバが認知する評価指数について複数の定義がなされている。

例として、TTC (Time-To-Collision : 衝突余裕時間)、 $1/TTC$ 、Kdb(接近離間状態評価指標)、TTC2nd (TTCの2次予測)、THW (Time-Head Way:車間時間)、MTC(Margin-to-Collision)、RF (Risk Feeling) 等がある [47]。

この中で AEB に関する指標として一般的に使用されているのは TTC で、AEB が作動するタイミングを、乗用車は TTC 1.4 s 以下、大型車では TTC 1.6 s 以下と国土交通省は定めている。

近藤崇之ら [48] [49]は、TTC、THW を用い、これらの逆数を組み合わせた RF(Risk Feeling)を、先行車を追従する車両のドライバが主観的に感じているリスクを示す指標として次式で提案している。

$$RF = A/T_{TC} + B/ T_{HW} \quad (1) \quad (\text{文献 [49]において } A=4, B=1)$$

$$T_{TC} = D/v_r \quad (2)$$

$$T_{HW} = D/v \quad (3)$$

$D$ : 2 車間距離 (m)

$v_r$ : 2 車両の相対速度 (m)

$v$ : 先行車を追う車両の速度 (m/s)

$T_{TC}$ : Time to Collision (s)

$T_{HW}$ : Time Head Way (s)

RF: Risk Feeling (1/s)

先行車を後続車が追う状況で後続車のドライバが先行車との衝突のリスクを認識してブレーキ操作をするタイミングについてシミュレーション実験で評価している。

研究結果 [49]では式(1) ( $A=4, B=1$ ) で求めた値を 2 とすることでドライバのリスク認識を近似している。

本研究ではドライバのリスク感を示す指標として、近藤らによる RF ( $A=4, B=1$ ) を使用する。

これまでの研究は自動運転技術 (レベル 1 以上) を搭載した車両を自車両と位置づけ、自車両のドライバが受けるリスクについてなされているものが多い。本研究では ADV が危険回避行動を行う場合において、自車である ADV だけでなく周辺車両のドライバが受けるリスクを考慮する。

## 第3章 周辺車両のリスク低減を考慮した ADS コンセプトの提案

### 3.1 自動運転システムの基本アーキテクチャの定義

自動運転システムの基本アーキテクチャの定義については HAVEit(Highly Automated Vehicles for intelligent transport) [50]が提供している ADS 単体のアーキテクチャを解析し、楠ら [51]と三浦ら [52]が SysML を用いて定義している。本研究では楠ら、三浦らによる ADS アーキテクチャを引用する。

ドライバの運転行動は、「認知」、「判断」、「操作」であり、ADS の機能はこれに置き換えることが出来る [53] [54]。Wickens の情報処理モデル [55]では人間がこの3つを行うモデルに「Working Memory」と「Long-Term Memory」が区別して書かれている。「Long-Term Memory」は経験と学習により蓄積される記憶であり、「予測」に使用されると考える。Wickens の情報処理モデルを参考にして、ドライバが行うことを Fig.3 に示した。

Fig.3 でドライバはインプットした情報を用いて「予測」を行っている。「判断」を行う際には、「前方の車両との距離が近くなったので衝突しないためにアクセル/ブレーキ操作により距離を保つ」「ステアリング操作により走行する車線を変更する」のように反射的、近視眼的に行うだけでなく、「数秒先、数分先、またはもっと先に何が起こりえるか」を予測して、それに基づいて、リスクを避ける行動をドライバは行っている。つまり、ドライバは「予測」を行うことで、心に余裕を持った運転を行う事が出来るものとする。「予測」を適切に行えるようになるためには、運転経験を重ねることによってどのような状況でどのような事が発生しうるか、特定の状況において周辺の交通参加者がどのような行動を取り得るかを知り、次にそのようなことが起きたときにどのように運転行為を行うべきかについて学習したことを記憶し、その記憶を蓄積させる。蓄積したパターンの多さはドライバがリスクを避けて運転行為を行うための選択肢を増やすことに他ならない。よって、この選択肢を多く持つドライバほど「予測」という行為を活用することで余裕をもってリスクを回避する機会が多くあると考える。日本においては、この「予測」によって危険予知をした結果を積極的に運転に活用することを「かもしれない運転」と名付けて推奨し、併せてそのための「危険予知トレーニング」が提唱されることがあり、例としては JAF (日本自動車連盟) の WEB サイトの記載がある [56]。

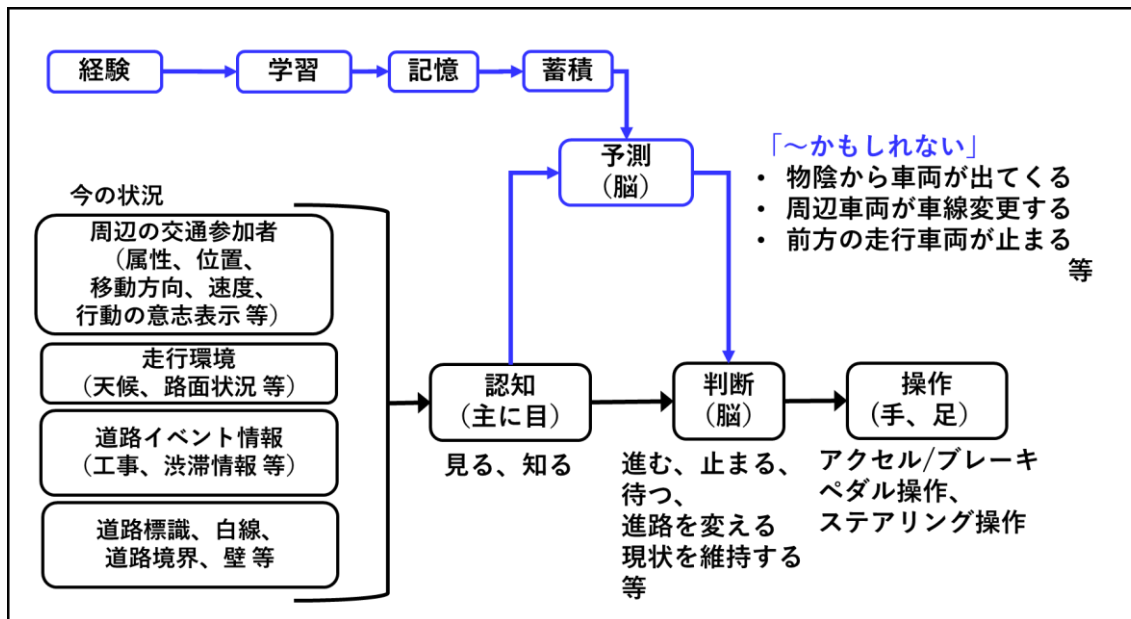


Fig. 3 ドライバの運転行動のモデル (Wickens 情報処理モデルを参考に作成)

自動運転車 (ADV) はドライバの代わりに搭載する自動運転システム(ADS)が運転行為を行うものであり、ADS は Fig.3 のドライバによる各行為を機能とする構成要素が組み合わされているものである。

実用化される予定の ADS の構成については、2020 年 11 月 11 日付け国土交通省報道資料 [57]に本田技研工業(株)提供として、2020 年度に販売予定のレベル 3 自動運転車の「自動運行装置の構成」として記載がある。ここに使用予定とされるデバイスの種類について、カメラ、レーダ、LiDAR が記載されている。カメラ、レーダ、LiDAR などのセンサは外界の状況を認識するために使用される。

Fig.4 は自動運転車(ADV)が自動運転で運用される際のコンテキストを示したものである。「Vehicle with Automated Driving Vehicle」は ADV のことを指し、これをまた、本文では「EGO Vehicle (EV)」と表現する。Fig.5 はコンテキストに含まれる外部環境の構成要素を定義したものであり、Fig.6 は外部環境の構成要素を定義したものである。これらより EV の周辺車両(Surrounding Mobility : SM)の存在を定義している。本論文の文章中は、周辺車両を SV (Surrounding Vehicle) の略語で扱う。SV は EV と同じ道路上を走行する。EV は搭載した ADS により、レベル 3 の自動運転を行う能力を有し、走行環境が設計運航領域 (ODD) に合致し、ドライバがレベル 3 モードでの走行を選択すれば、そのようにそれを実行する。Fig.7 は外部環境(External Environment : EE)に含まれる自然環境の構成要素を定義したものである。ODD に大きく関係する。外部環境には道路区分 (高速道路、一般道他)、天候などが含まれ、例えば、一般道での使用が対象外、雨天で視界が悪く周辺の交通状況を ADS が判断しにくい等、ADS の性能の限界によりレベル 3 モードでの走行を行うことが出来ない場合がある。ADS にとって、外部環境は自動運転走行の可否を判断する上で重要である。

一方で、周辺車両の自動運転レベルは様々であり、現状の公道を一般車両の類いとして走行することを前提とした ADV (レベル 3) は、様々な自動運転レベル、つまり、自動運転を行わない周辺車両と同じ道路上を混走することとなる。別の視点で捉えた場合、公道を走行する自動運転を行わない多くの車両、それを運転するドライバは、ADV の登場により、これを同じ空間に存在する交通参加者として受け入れなくてはならない。EV、SV とともに運転席にはドライバが搭乗している。ADV(レベル 3) である EV のドライバは、ADV が ODD にあるとき、ADV をレベル 3 で走行させることを選択し、また、ODD を外れる場合に ADS が運転行為を引き継ぐ相手として、いつでも ADS からの運転交代要求に応えられるように準備しておく必要がある。つまりは、EV が自動運転で走行している場合においても運転交代先として、ADS からの運転交代要求(RTI)に答えるため待機するという機能を持たなくてはならない。また、SV のドライバ(SVD) は常に運転行為を行う上で安全運転を行う義務を負っている。周囲を走行する ADV についても交通参加者の一つとして注意を払わなくてはならない

。

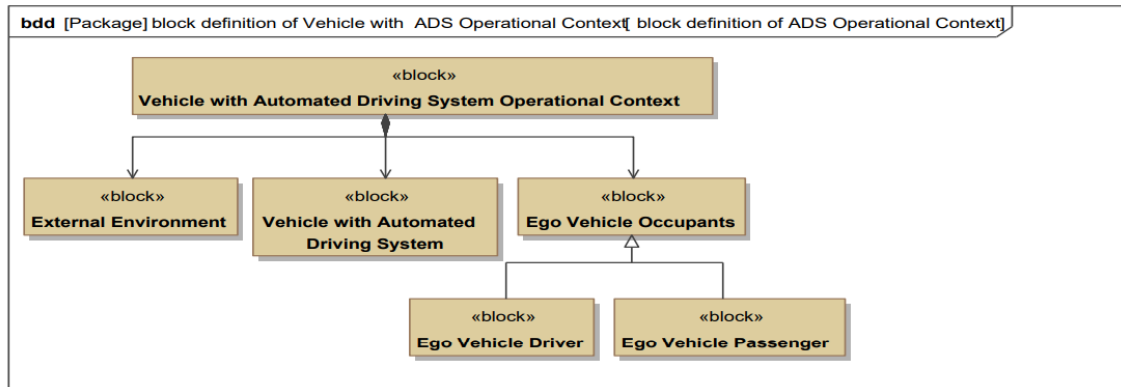


Fig. 4 自動運転車の運用コンテキスト

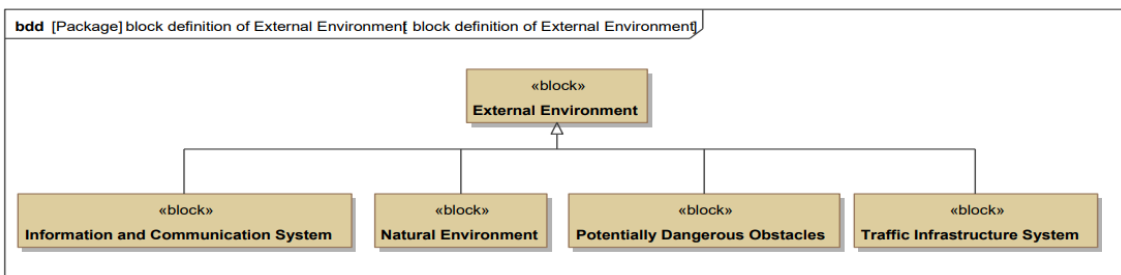


Fig. 5 外部環境の構成要素を示すブロック定義図

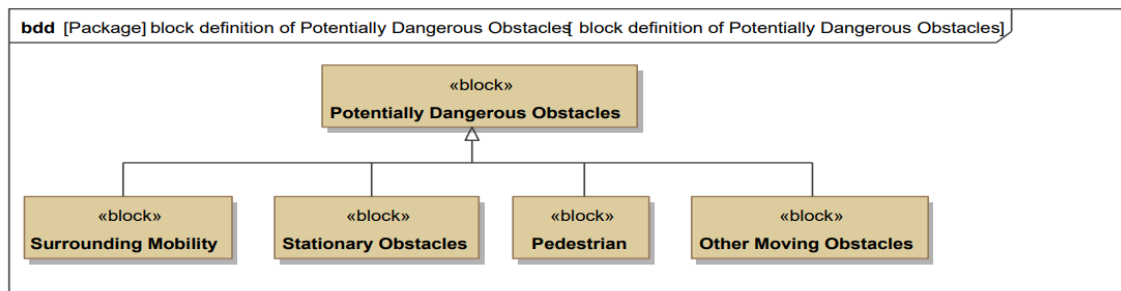


Fig. 6 潜在的な危険を有する障害物の構成要素を示すブロック定義図

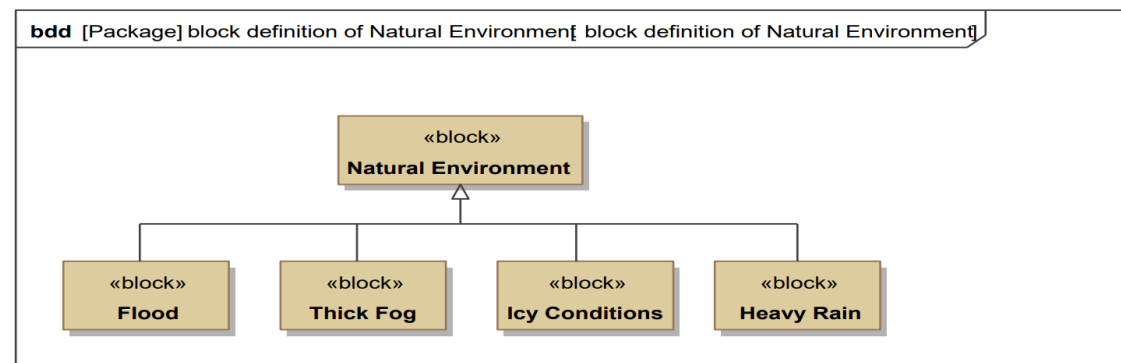


Fig. 7 自然環境の構成要素を示すブロック定義図

Fig.4-7 は三浦ら [52]より引用

Fig.8 は自動運転車 (ADV)のシステム構成を示したものであり、これらは、車体(EV)、自動運転システム(ADS)、ヒューマンマシンインターフェース(HMI)、コマンド実行システム(CES)により構成されるものである。ADS は自車両が現在 ODD 内にあるか否か、自動運転が実施可能な状態であるかを判断し、可能である場合には、自動運転走行可能である旨を HMI を通じて自車のドライバ (EVD) へ知らせる。EVD が HMI を通じて、自動運転走行の実行を選択し ADS へ伝えると、ADS はそれを受けて、自動運転走行の実行のための様々な判断を行い、車体を自動運転走行させるためのコマンドを CES に送る。道路状況等を考慮して自動運転をどのように行うかは ADS によって決められる。CES はこれを受けて、車体の加速、減速、操舵、進行方向の変更などを行う。また、ADS は HMI を通じて EVD の状態を監視する機能を持つ。HMI、CES を ADS の一部としていないのは自動運転で走行せず、EVD による運転で EV が走行する場合においても、HMI、CES は使用されるためである。

Fig.9 は自動運転システム(ADS)の構成である。ADS は自車のドライバ (EVD) を監視するためのモニタシステム(DMS)、外界を認識するためのシステム (PS)、自動運転をどのように実行するかを決め、HMI、CES に命令を出す Automated Driving Commanded System(ADCS)で構成される。

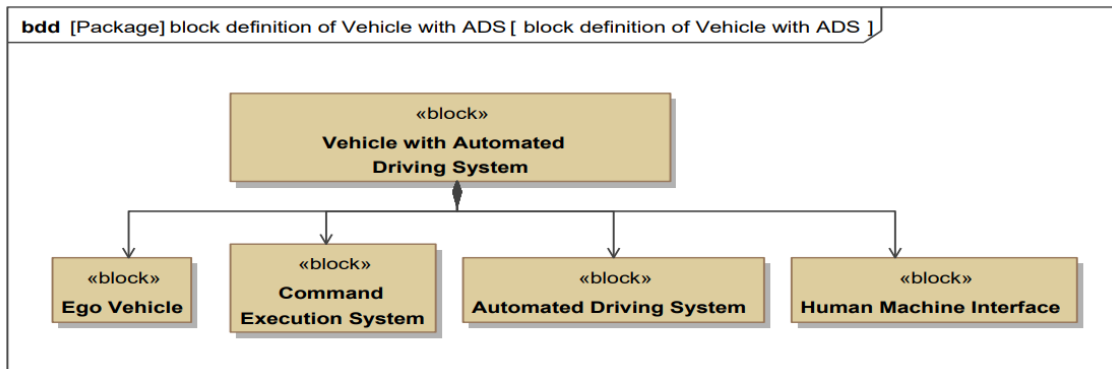


Fig. 8 自動運転の構成要素を示すブロック図

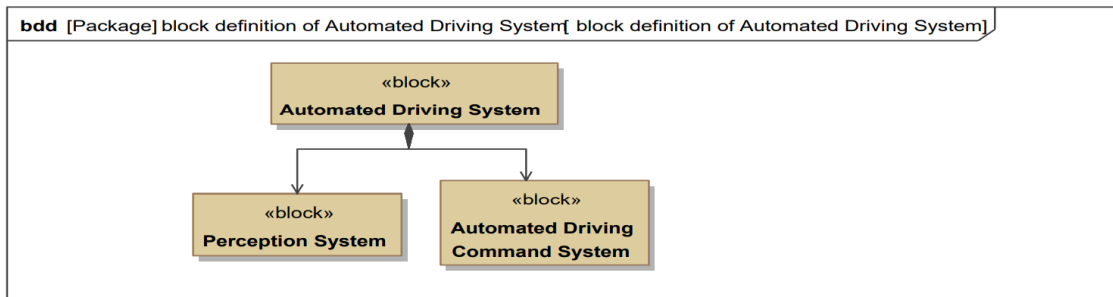


Fig. 9 ADS の構成要素を示すブロック図

Fig.8, 9 : 三浦ら [52]より引用

Fig.10, 11 は楠ら [51]により提案された外界認識システム(PS)の構成、及び、PS に使用可能なセンシングデバイス(Sensor)を示したものである。PS は EV の周辺の道路状況を認識する機能を実現するためのシステムであり、ADS は PS からの情報を基にどのような自動運転走行を行うか、どのようにすれば自動運転を行うことが出来るかを判断することから、PS は ADS の中でも非常に重要な役割を持つものである。PS は外界を認識するためのセンシングデバイスで構成される。センシングデバイスは何を検知するかでその種類が異なる。例えば、EV の周辺に存在する物体が人であるか、車両であるかを検知する場合、カメラ (Digital Camera) を使用すると可能だが、レーダ(Rader)はこれに向かない。一方、接近する物体の速度を検知する場合にはドップラー効果を検知原理に応用するレーダが向いている。また、外界にあるものを検知する必要から、センシングデバイスの検知性能は外界環境(EE)によって左右される。例えば、カメラは撮像素子と処理回路の改良により改善されてはいるが、一般的には暗所での検知は苦手である。また、降雨、濃霧などで検知対象物が視覚的に見えにくい状況では、人間の目と同様に視覚を利用するカメラによる検知は困難になりやすい。また、自動運転レベルがレベル 3 未満においては、車両のシステムが行うのは運転支援であり、運転行為を主体で行うのは人間のドライバーであることから、運転支援中に車両システムがセンシングが苦手な場面に遭遇してもドライバーがこれに対処することが前提となるが、レベル 3 の自動運転の場合、自動運転走行中においては運転者(EVD)を周辺監視の義務からも解放するため、このような場面でもシステムが対処する必要性が生じる可能性が考えられる。このために冗長性を考慮したデバイス構成とするため、より多くのセンシングデバイスを搭載する必要があるかもしれない。

Fig.11 に記載した構成要素に Lidar がある。これは「Light Detection and Ranging」の略であり、赤外線レーザーを使用した検知デバイスである。周波数が高く波長が短いレーザーを検知対象物に照射して反射波を読み取ることで検知対象物の位置と輪郭を検知出来るものであるが、これも EV と検知対象物の間に雨などが存在すると検知の妨げになる。各種類のセンシングデバイスはその検知原理により長所と短所、検知を阻害する要因がそれぞれあることから、一つのセンシングデバイスに頼るのではなく、それぞれを組み合わせ使用することが、運転の主体をドライバーではなく、ADS が担うレベル 3 においてはより重要となる。

このように PS は ADS がどのような場面でどのように自動運転を行うか、自車の周辺のどの範囲にある何をどのように検知するか、しなければならないかということに大きく影響を受け、また、デバイスの検知の特性と性能限界は自動運転の性格、性能に大きく影響を与えるものであるために、その構成は様々なパターンが考えられる。



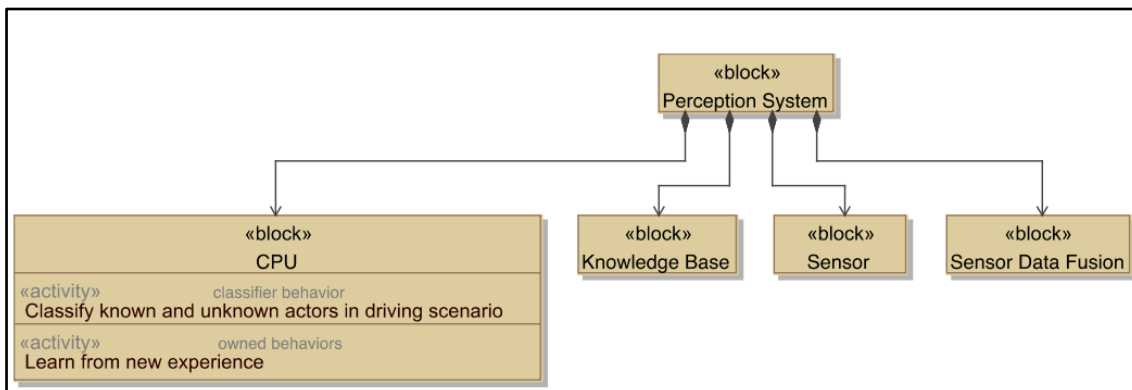


Fig. 10 楠ら [51]により提案された ADS の Perception system のアーキテクチャ

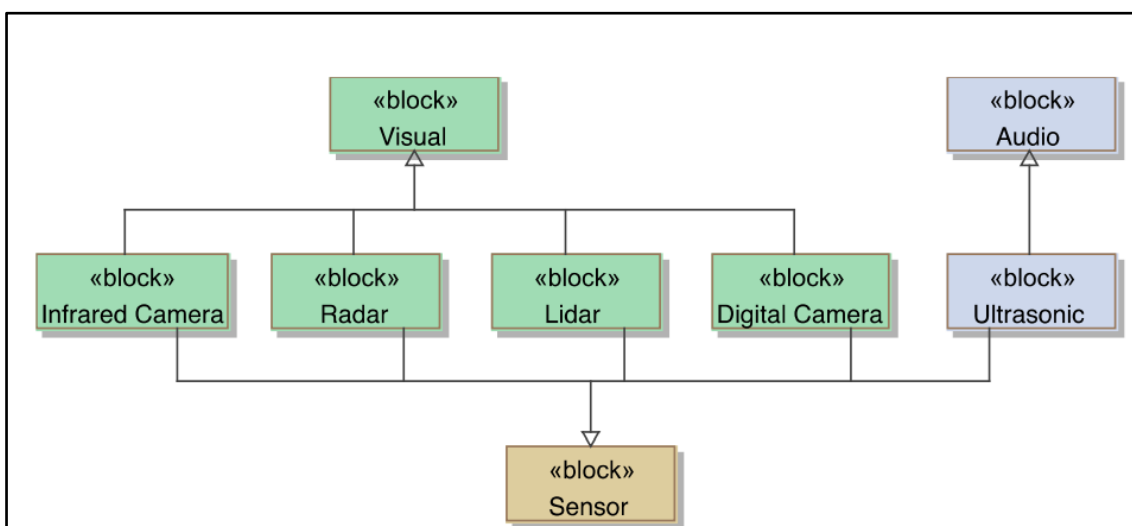


Fig. 11 Description of available sensors for the ADS as type of visual and audio sensing  
楠ら [51]より引用

Fig.12,13,14 は三浦らの研究 [52]で作成されたものである。

Fig.12 は ADV の内部での各システムの振る舞いが描かれている。ADS に外部からの情報が入力され、また、HMI からドライバの情報を受け取り、EV を動かすための信号を送り、そして、動作中の EV の状態を得ながらこれを続ける。

Fig.13 は ADS 内部の PS と ADCS の振る舞いが描かれている。PS が各種の情報を認知して ADCS に情報を送る役割を行う。ADS は PS から得た情報を基に ADV を動かす信号を HMI、CES へ送る。PS が外部情報「External Environment state」を入力する役割であることが分かる。三浦のモデルでは「External Environment」に含まれる「Potentially Dangerous Obstacles」に「Surrounding Mobility」がある構成となる。

Fig.14 は走行エリアの決定に基づいて走行する ADV の振る舞いが記述されている。ここで PS が外部から得ていた情報に周辺車両 (Surrounding Mobility) の情報が含まれていることが分かる。周辺車両のスピード、位置を把握して、PS は他 EV の速度と位置、HMI を通じてドライバの状態、そしてそれらの情報を基に PS が走行可能なエリアを決定し、ADCS へ情報を送り、ASCS が加速度や、この図ではレーンチェンジの実施を決めて、EV がそれに基づいて動作する。

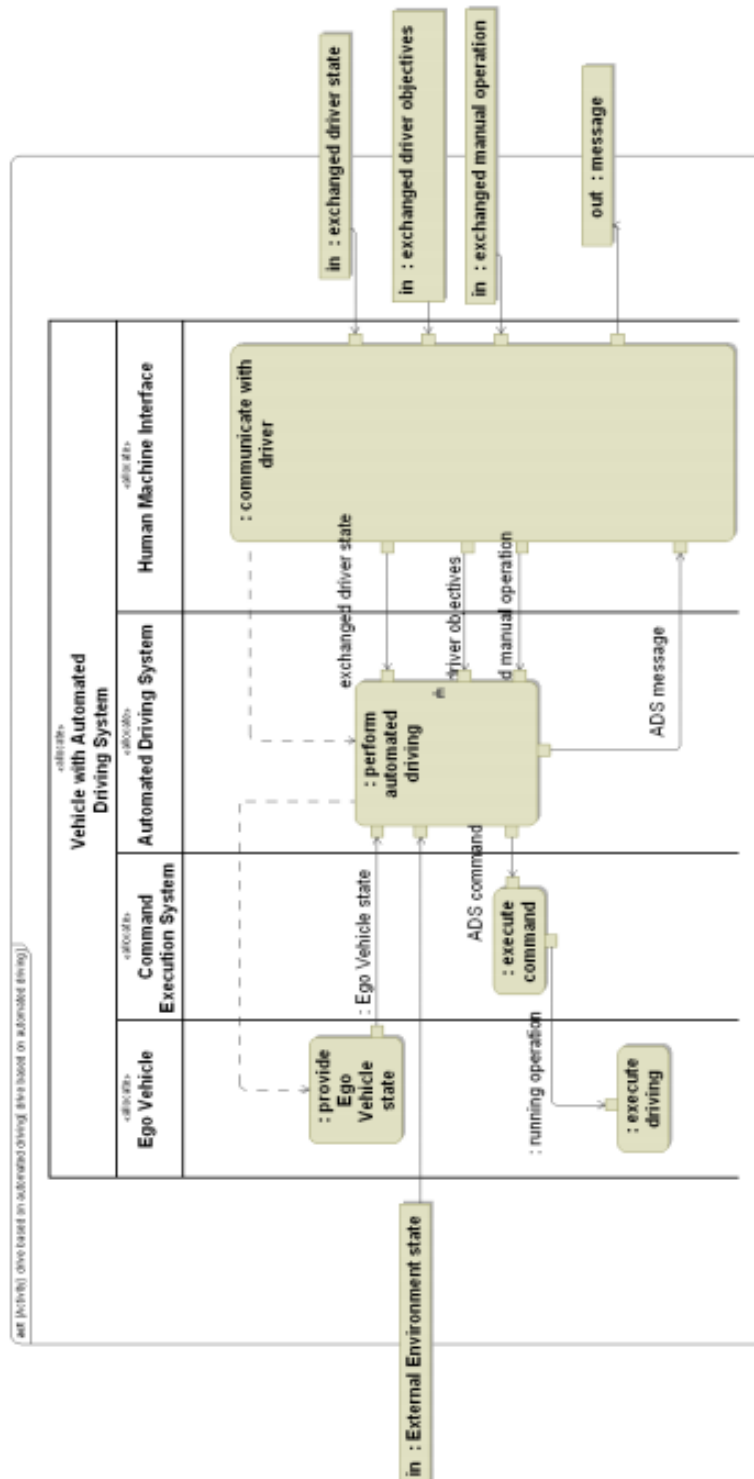


Fig. 12 構成要素へ割り当てた後の「自動運転に基づいて運転する」内部の振る舞いの記述

(三浦 [52]より)

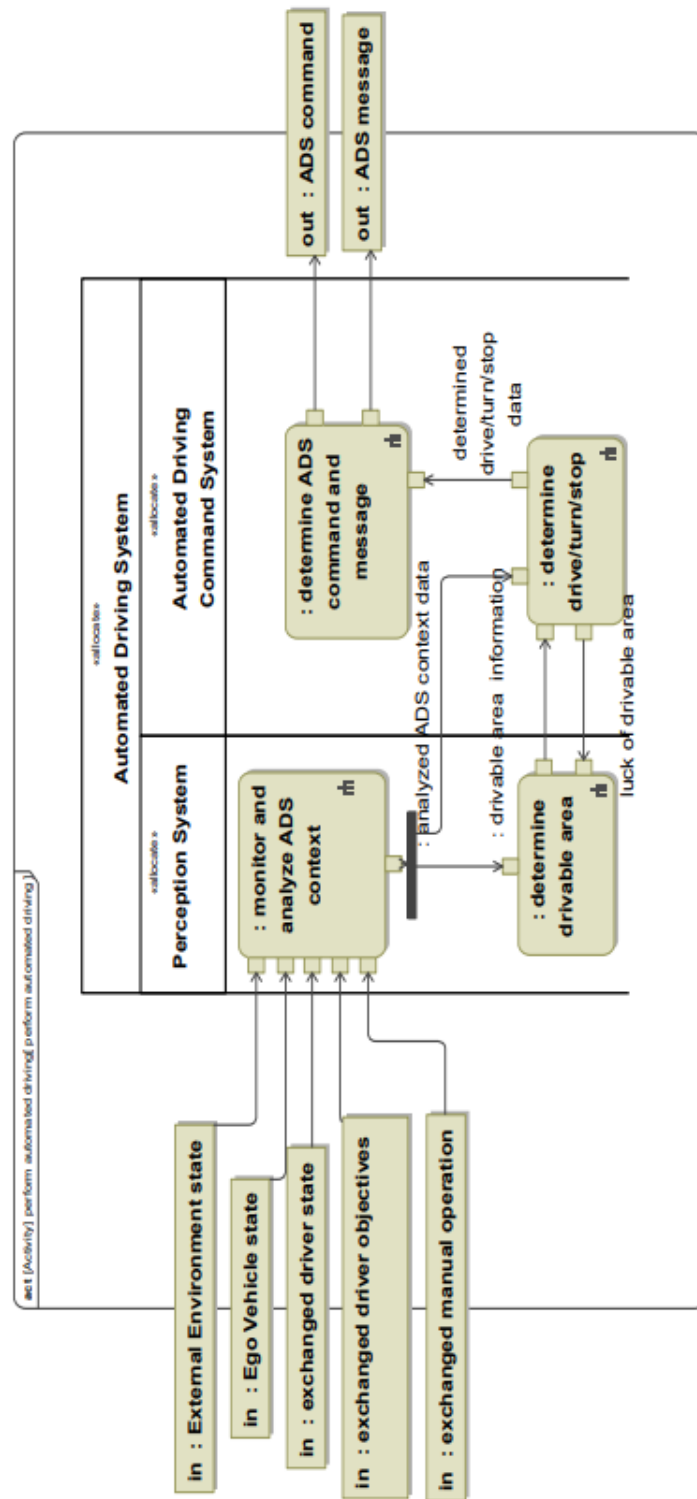


Fig. 13 構成要素へ割り当てた後「自動運転を実施する」内部の振る舞いの記述 (三浦 [52]より)

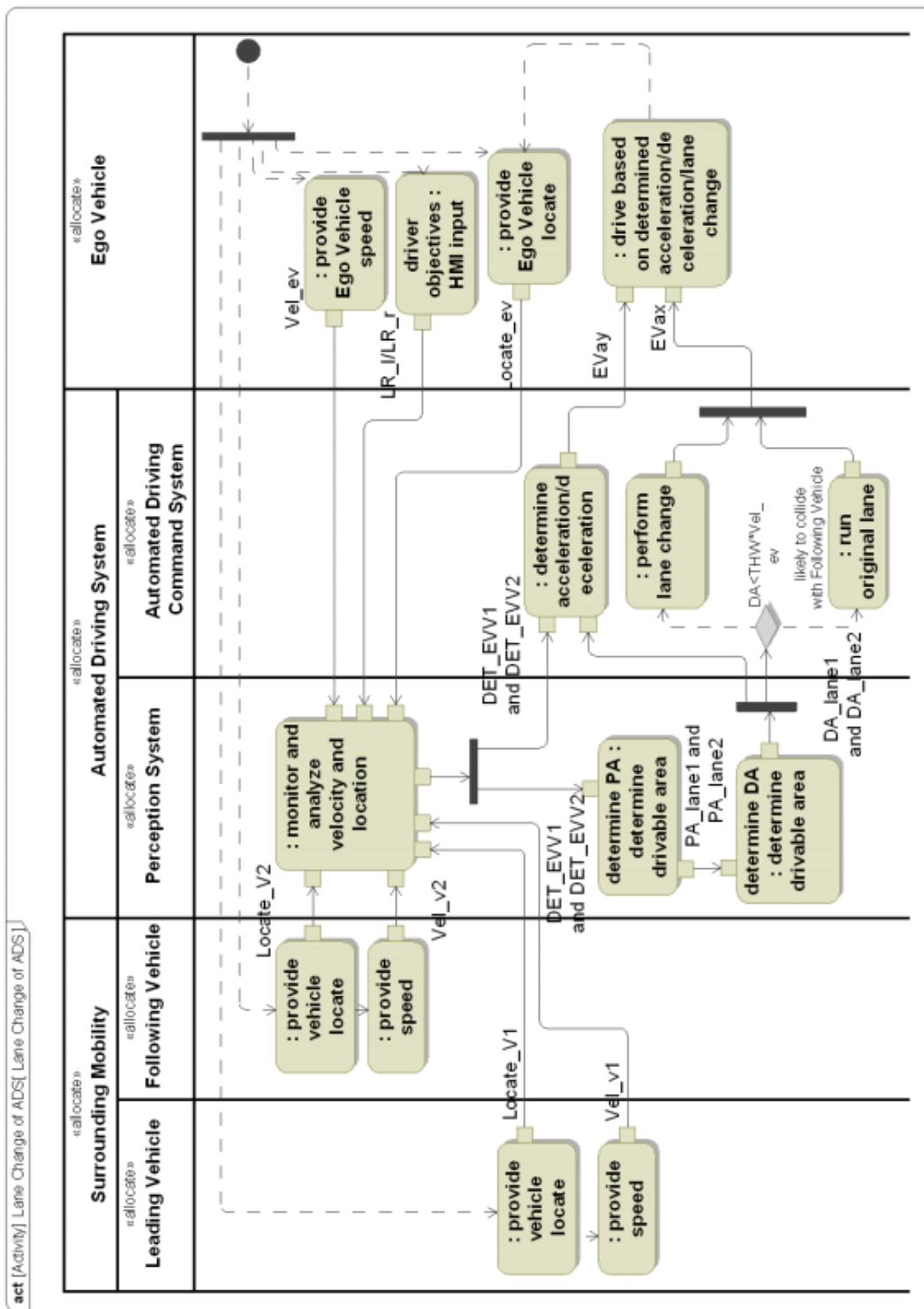


Fig. 14 走行可能エリアの決定に基づいて走行する自動車のアクティビティ図 (三浦 [52]より)

## 3.2 周辺車両のリスク低減を考慮した ADS コンセプトの提案

自動運転車 (ADV) が社会から存在を受容されるために、緊急回避行動を行う場合や異常が発生して通常の走行が困難となる場合においても、周辺の交通参加者へのリスクを最小限とする行動を行うための ADS コンセプトを提案する。

### 3.2.1 ドライバが行う「予測」について

3.1 章にドライバーがリスクを回避した運転を行うために過去の「経験」から「学習」したことを「蓄積」してこれを利用して現在の走行状況について何が起こりえるかの「予測」を行い、現在の運転行為に反映することについて述べた。本研究ではこれを取り入れて、交通状況の急変などにより通常走行が難しい状況においても余裕のある運転を行うことを可能として周辺車両に対して急加速、急減速、急操舵などを必要とさせず、周辺車両 (SV) のドライバーが感じるリスクを低く抑えて平常心で行動することを可能とすることで、ADV が同じ道路上に存在することを他の交通参加者から受容されることを期待するものである。

Fig.15 の場面を想定する。高速道路上を 3 台の車両が走行している。車両 A、V、B はそれぞれ人間のドライバーが運転している車両である。中でも車両 V を運転しているのは熟練ドライバーである。車両 V のドライバーは前方を走行する車両 A を基準として、車両 A との距離を一定値に調整しながら走行している。そして、車両 B は車両 V を基準として自車の走行位置を調整している。ここで、車両 A が交通の乱れを生じさせるとその影響は周辺車両である車両 V、B にも影響を及ぼすこととなる。

この運転中において、熟練ドライバーが行っている「予測」に注目する。

Fig.16 はドライバーが行っていることをユースケースとして記述したものである。このような変化の少ない安定した状況でも、ドライバーは多くの事を行っていることが分かる。中でも、青い点線枠内が「予測」に関して行うことであり、これを行うためには「蓄積された経験データ」が使われ、ベテランドライバーの場合、運転経験を積んだことで蓄積データが多く有利である。

Fig.17 にドライバーが周辺車両などの関係物との間で行っていることを図示した。



Fig. 15 熟練ドライバ走行図

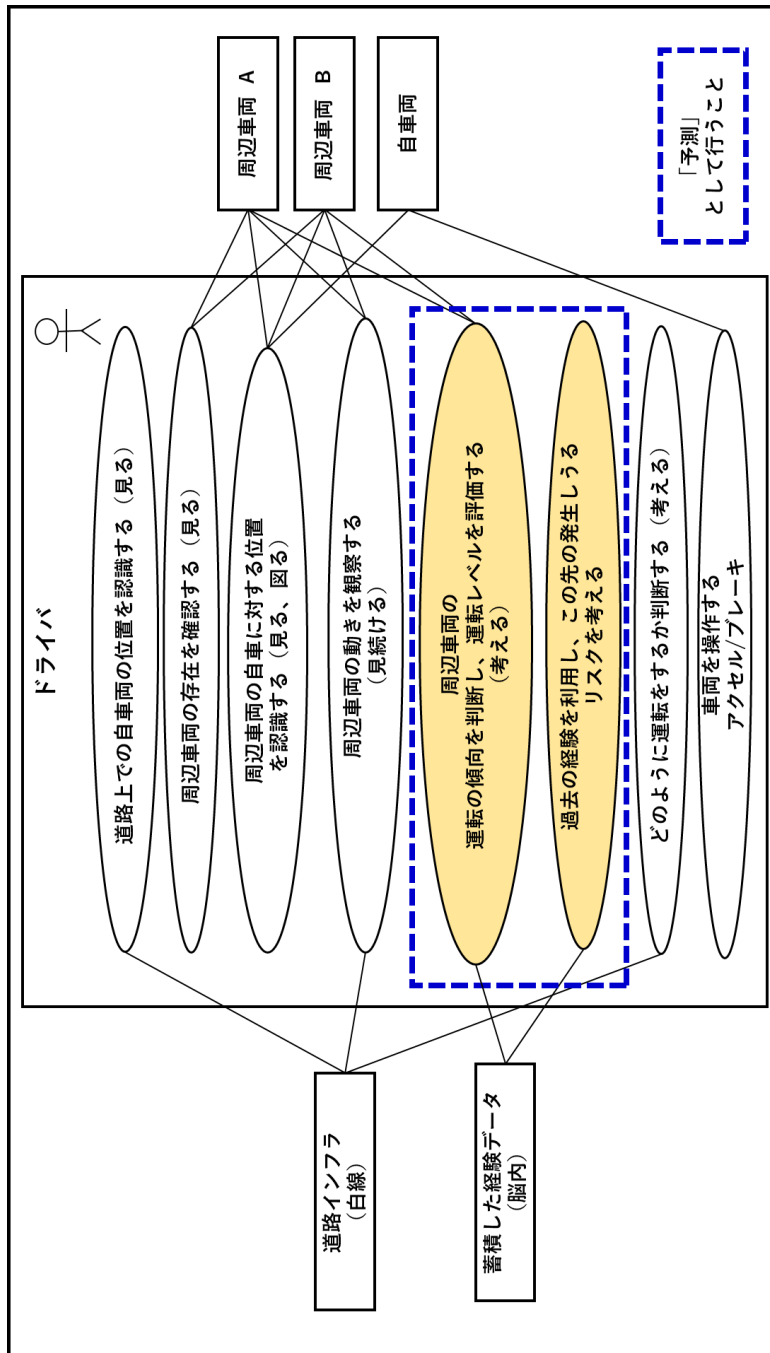


Fig. 16 熟練ドライバーが運転を行う際のユースケース



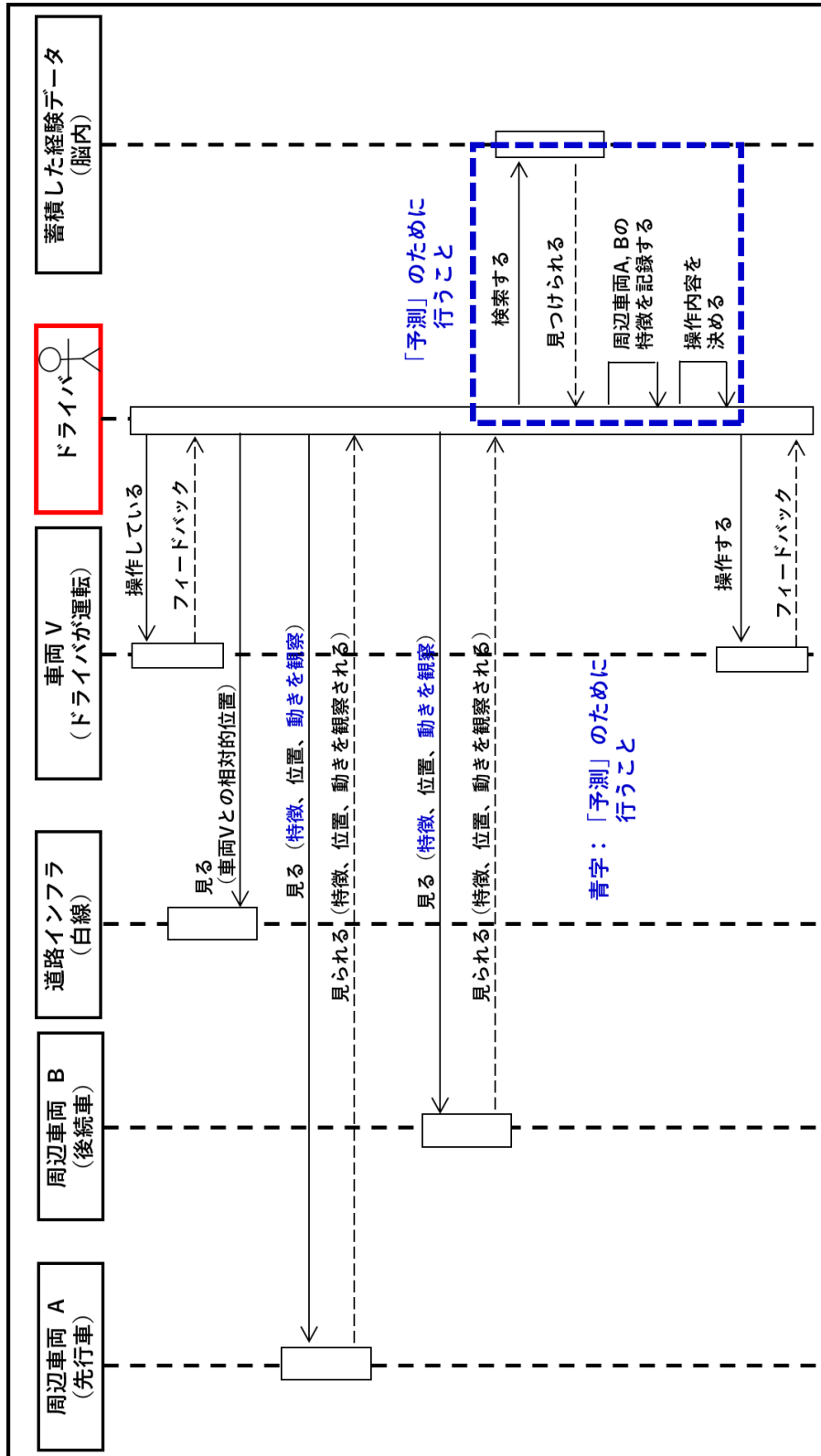


Fig. 17 予測運転を行う熟練ドライバーによる他システムとのやりとり

Fig.17 から「予測」のために行うことがより具体的に見ることが出来る。

また、「予測」という行為だけでなく、基本的事項としてドライバが外部の関係物である周辺車両 A、B、道路インフラ（白線）に対して、以下のことを行っているのが分かる。

- ・ 白線の位置を知る
- ・ 周辺車両の特徴を識別する
- ・ 周辺車両の位置を知る
- ・ 周辺車両の動きを知る

Fig.17 ではベテランドライバによる周囲の確認行為を「見る」と表現したが、「見る」には上記のように様々なものがある。これを ADS に置き換えて考えた場合、周辺車両 A、B、道路インフラ（白線）は PS の検知対象物である。

センシングデバイスによる見る（検知する）機能は検知対象物の見られる（検知される）機能との組み合わせにより成立する。センシングデバイスは人間の目のように万能ではなく、使用するセンシングデバイスの検知原理によりどのようなものの何を検知出来るかが決まる。

### 3.2.2 コンセプトの狙い

ポンサントーンら [23]はリスクポテンシャルという概念に基づき、自車両がこれを評価して、静止車両からの人の飛び出しなどを予測して事故を起こさぬように熟練ドライバーの様な運転軌跡を走行することを研究している。

本研究では、走行する車両の周辺には周辺車両に影響を及ぼすリスクエリアが存在し、また、車両を運転するドライバーやADSまたは、ADASの運転レベル（技量、状態）は様々であり、運転レベルに応じてリスクエリアの広さ、形状に違いがあると考えられる。(Fig.18)

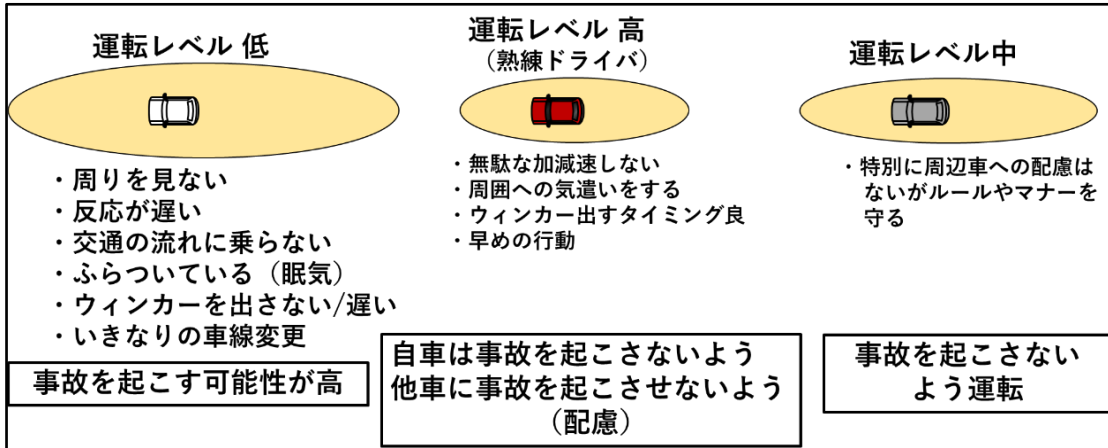


Fig. 18 走行する車両が周辺車両に及ぼすリスクエリアの概念

Fig.19 は周辺監視を怠る運転レベルが低い車両によって、その車両の後方に特に広いリスクエリアが存在しそれが顕在化するシナリオを示したものである。

車両 A、EV、B の順番に高速道路上を車両が走行している。車両 A のドライバーが生来からの性格や体調不調、寝不足などで不注意、または、注意散漫な状態にある。前方に障害物が存在するが発見と対応が遅れて、直前で障害物を回避する。しかし、車両 EV のドライバーからは車両 A が前方に存在することで障害物の存在を知ることが出来ない。車両 B のドライバーにとっても同様であり、EV が前方にある限り障害物を発見出来ない。これにより、車両 A が障害物を急操舵で回避した後に、EV は障害物の発見と制動開始が遅れることで障害物に衝突し、車両 B も急制動で対応し車両 A の直後で停車、又は車両 A に衝突する。図中の「EV」は「Ego Vehicle」の略である。

極度の睡眠不足や注意散漫なドライバーはこの状況になる前からふらつき運転や周囲への配慮がない運転を行っていることが考えられる。もし、EV を熟練ドライバーが運転し、ドライバーが危険を予知して回避するための運転技術を身に付けている場合、車両 A の挙動から車両 A を危険発生源であると見なして、問題イベントの発生に備えて、車両 A との距離を長めに維持し、場合によっては車両 A を追い越すなどして、車両 A から自車を遠ざけるだろう。これにより、問題イベントが発生した場合の影響を車両 A だけでなく、車両 B も受けずに済むか、問題イベント発生前に車両 B のドライバーからも車両 A がどのような状態であるかを認識し、EV のドライバーと同様に危険回避に向けた事前行動をとるための選択肢を得られる。これにより、車両 A の影響を最小限に抑えて交通環境への影響と被害を低減する。

このときに EV の熟練ドライバーが行っていたのは、車両 A の状態を観察して運転レベルを評価し、どのような危険が生じるかを予測し、「通常の車両に対する以上に車両 A との間距離を設けて走行する」という、「危険回避に向けた事前準備」を行ったことになる。(Fig.20)

Fig.3 のドライバーの運転行動のモデルに「危険回避に向けた事前準備」を追加して「熟練ドライバーの運転行動モデル」とした(Fig.21)。

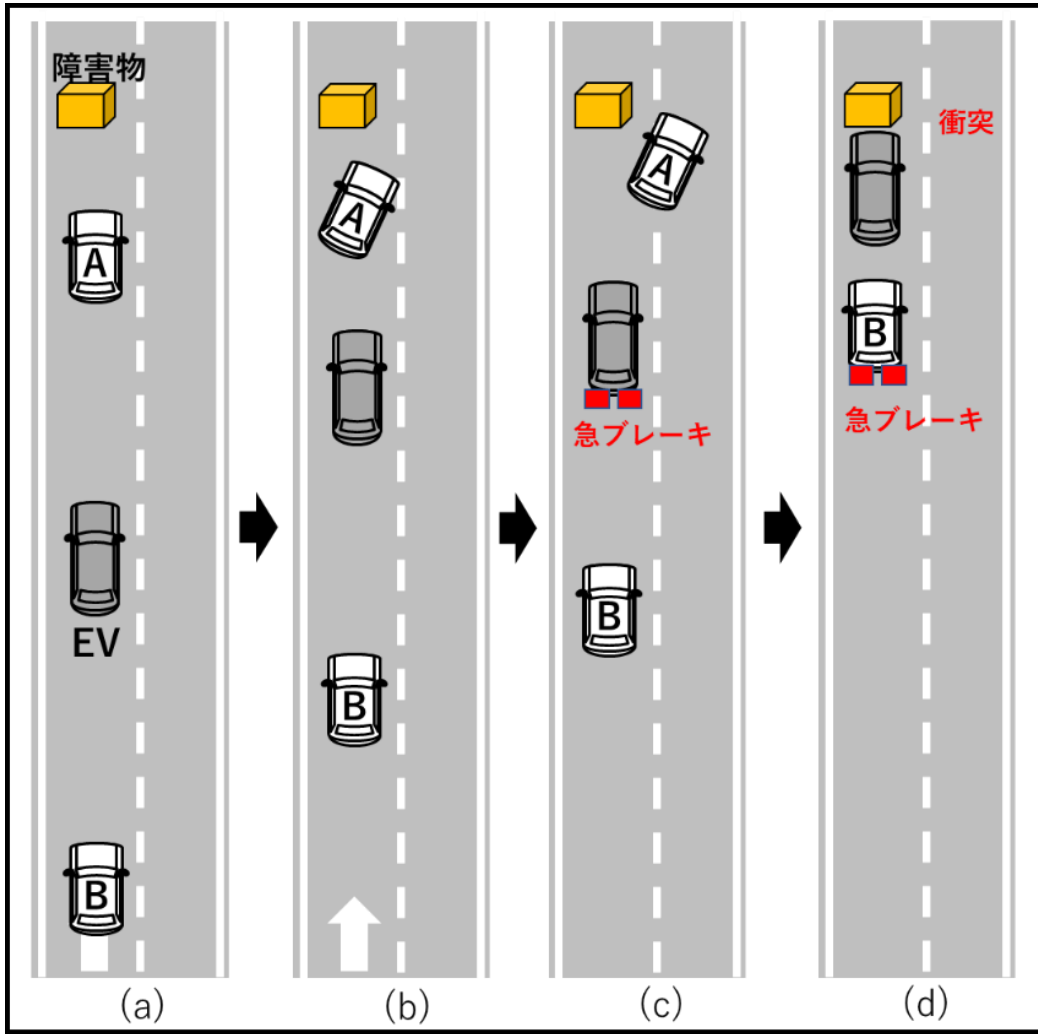


Fig. 19 一台の不注意運転の影響が後続車に及ぶシナリオ

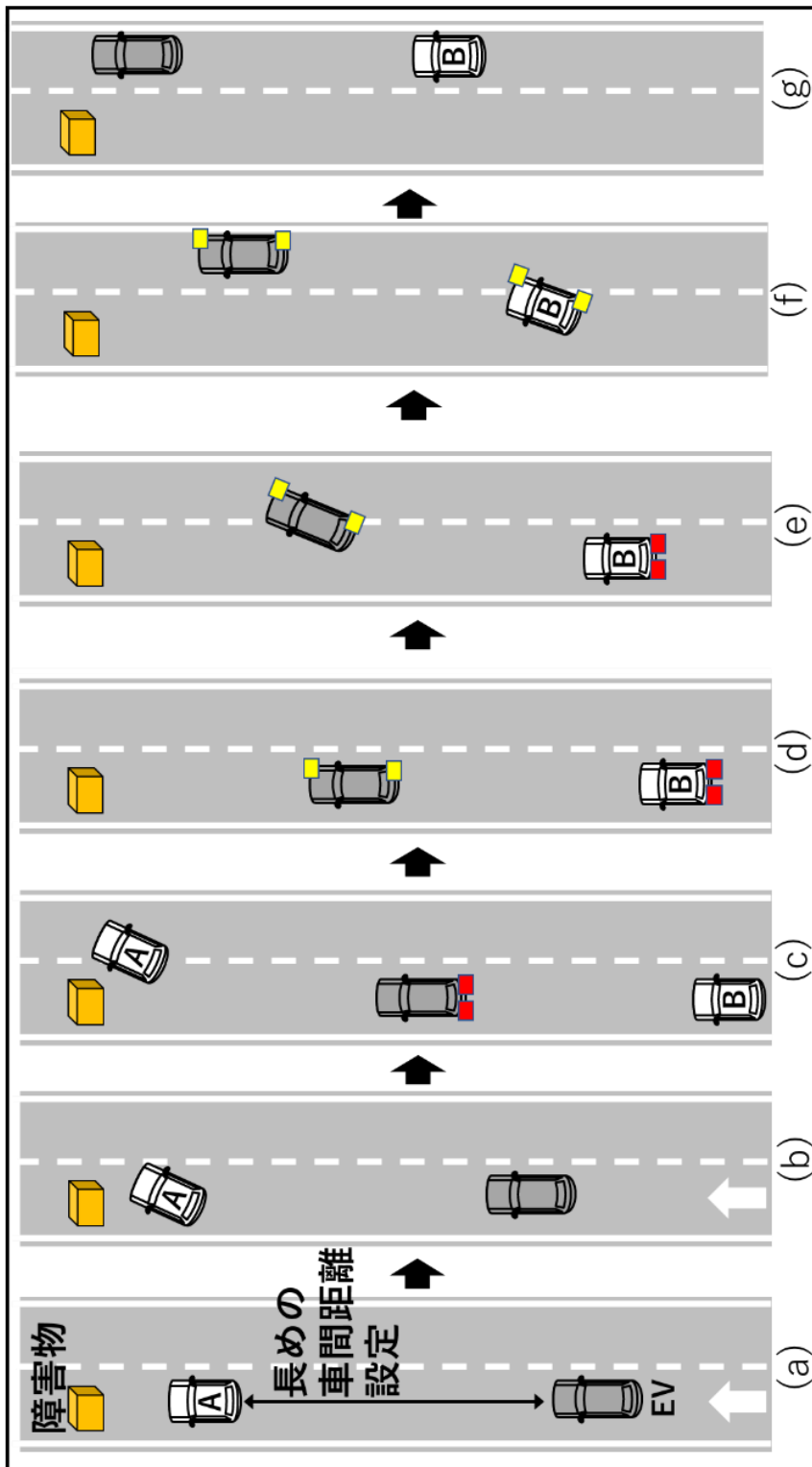


Fig. 20 EVが「予測」を活用して危険を回避するシナリオ

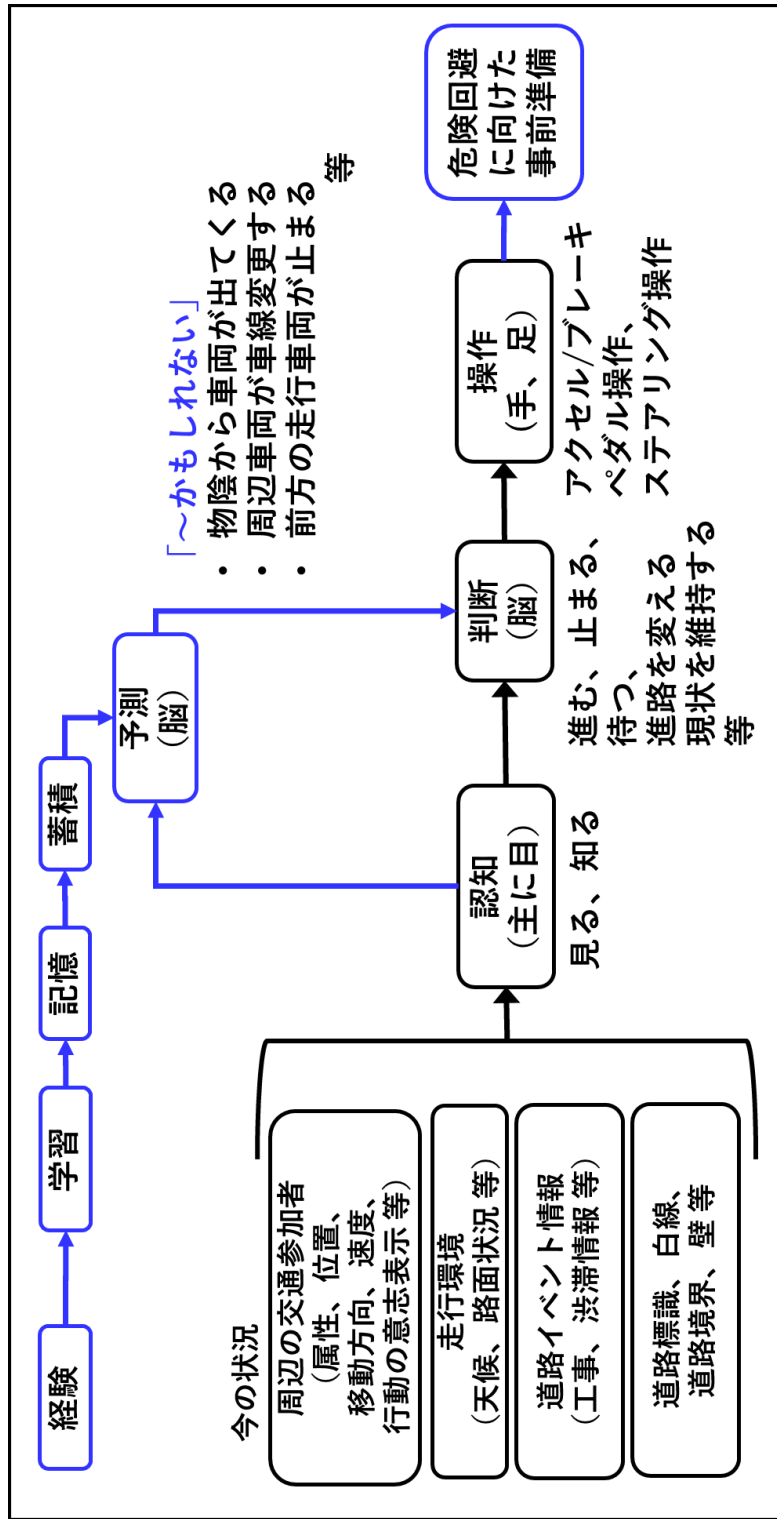


Fig. 21 熟練ドライバーの運転行動モデル

このように、「予測」を活用して「危険回避に向けた事前準備」を運転に取り入れた運転を行うことは、自車両だけでなく、その周辺車両のリスクの低減につながり、安全上、望ましくない運転が行われる車両の影響で生じる事故の防止につながる。ADSが制御するADVが「予測」による「危険回避に向けた事前準備」を取り入れて周囲の車両のリスクを低減させる運転を行うことは、道路上に生じる危険の連鎖を断ち切るだけでなく、周囲のドライバーへの安心感へとつながり信頼を得られ、ADVがそのように振る舞うことが広く認知されて、ADVが社会から受容される存在になることを期待する。

本研究では、ADVがベテランドライバーの「予測」を活用した「危険回避に向けた事前準備」を取り入れた運転による振る舞いをするために、リスク源となる車両Aに対して、距離を保ち近づかないエリアを定義する。本研究ではこのエリアをPRAV (Potential Risk Area of the Vehicle)、と称する。(Fig.22) また、PRAVは車両の運転レベルに応じた広さ、寸法があると考えられる。(Fig.23)



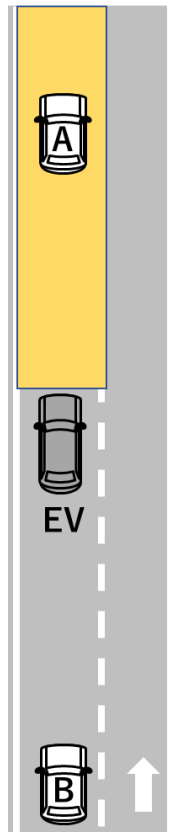


Fig. 22 PRAV コンセプト模式図

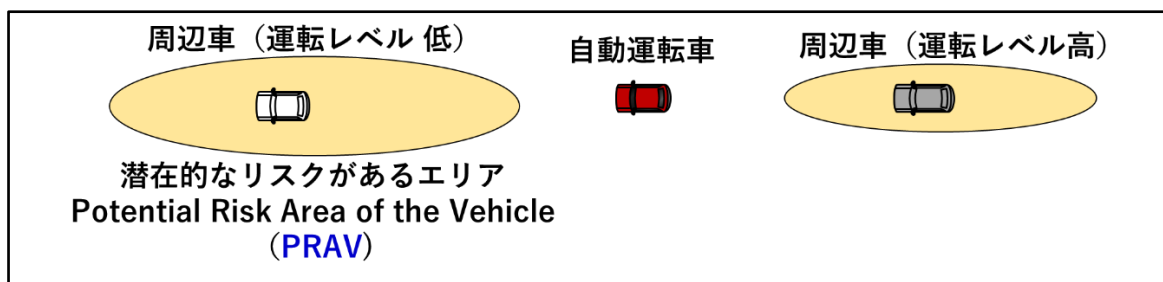


Fig. 23 PRAV コンセプト模式図 2

### 3.2.3 提案するコンセプト (PRAV コンセプト)

本コンセプトの ADS を説明する。アーキテクチャは 3.1 章で示した基本アーキテクチャであり、これまで楠ら [51]、三浦ら [52] が研究してきたものを踏襲する。

Fig.24 に ADS が本コンセプトで行うことを図示した。以下に説明する。

ADS は、常に周辺車両の挙動、動作の観察に基づき運転レベルを評価し、それらの周辺車両の運転の特性と車両の特徴を記憶する。そして、時々刻々変化する交通状況に対応し、ADS を搭載する自車両(EV)は、各周辺車両の運転レベルを踏まえた上での安全余裕を確保できる。

EV は搭載したセンサ類 (カメラ、レーダ、LiDAR など) を用いて検知した周辺車両の動作から、それらの運転内容を運転レベルとして評価し、記録して EV の制御に利用するものである。

EV は周辺車両が自車のセンサ類の検知範囲に入ったときからその動きを観察し始める。周辺車両の動きからその車両の動作の特徴を判断し、「運転レベル」として記録する。各周辺車両についてその動作により運転レベルを判定し記録した結果を用いて、例えば、「運転レベル低」である車両 A の後方を EV が走行する場合には、車両 A との車間距離を通常よりも長めに設定するよう、EV の運行装置が制御を行う。これにより、車両 A が後方を走行する EV への配慮なく、突然の急制動を行った場合でも EV は車両 A との衝突回避に対して急制動を行うことなく対応する余裕が生まれる。さらに、EV の後方を走行する車両 B も EV との衝突回避のための急制動を行う必要がなくなり、車両 A の急制動による衝突事故の発生の可能性を交通の流れを乱すことなく抑制することが可能となる。

このように本装置は周辺車両の動作からそれらの運転レベルを評価し、”それらに応じた制御を行うことで、これから起こりうる交通状況の急変に対して予め、EV、及び、各周辺車両が余裕を持って対処するための準備を行うものである。

周辺車両に対しての評価結果でその車両との車間距離を調整したその距離が PRAV である。

Fig.25 は本コンセプトで行う機能をシステムの構成要素に割り当てたものである。PS(Perception System)は自車両の状態と周辺車両の状態、及び、白線の位置などを監視して得られたデータをフュージョン (融合) し ADCS(Automated Driving Commanded System)へ送る。ADCSはこのデータを基に周辺車両のレベルを評価し、PRAV を算出して、車両をどのように動かすかを決定し、CES(Command Execution System)へコマンドを送り、CES がコマンドに基づいて車両を操作する。

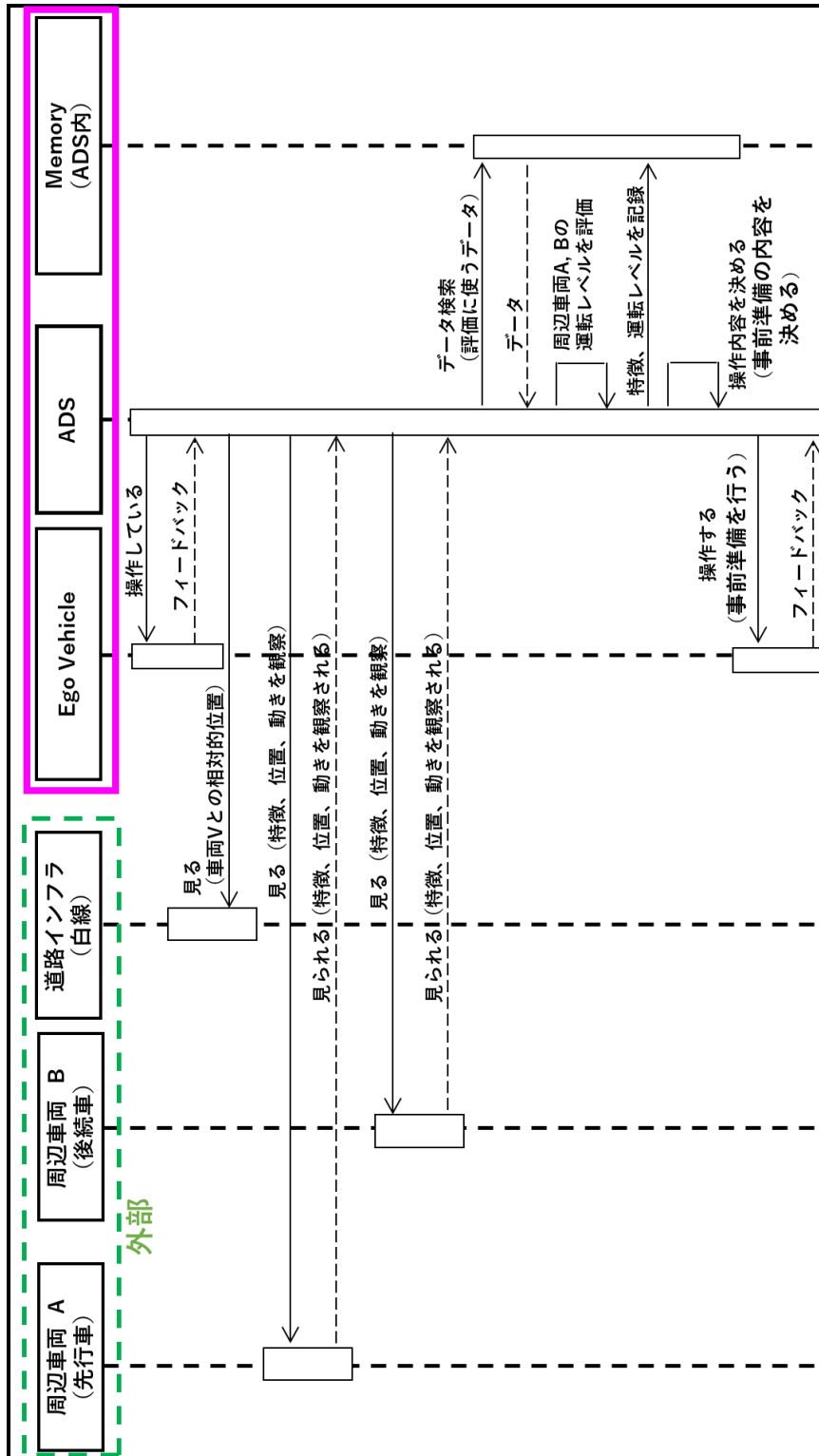


Fig. 24 システムが事前準備で行うこと

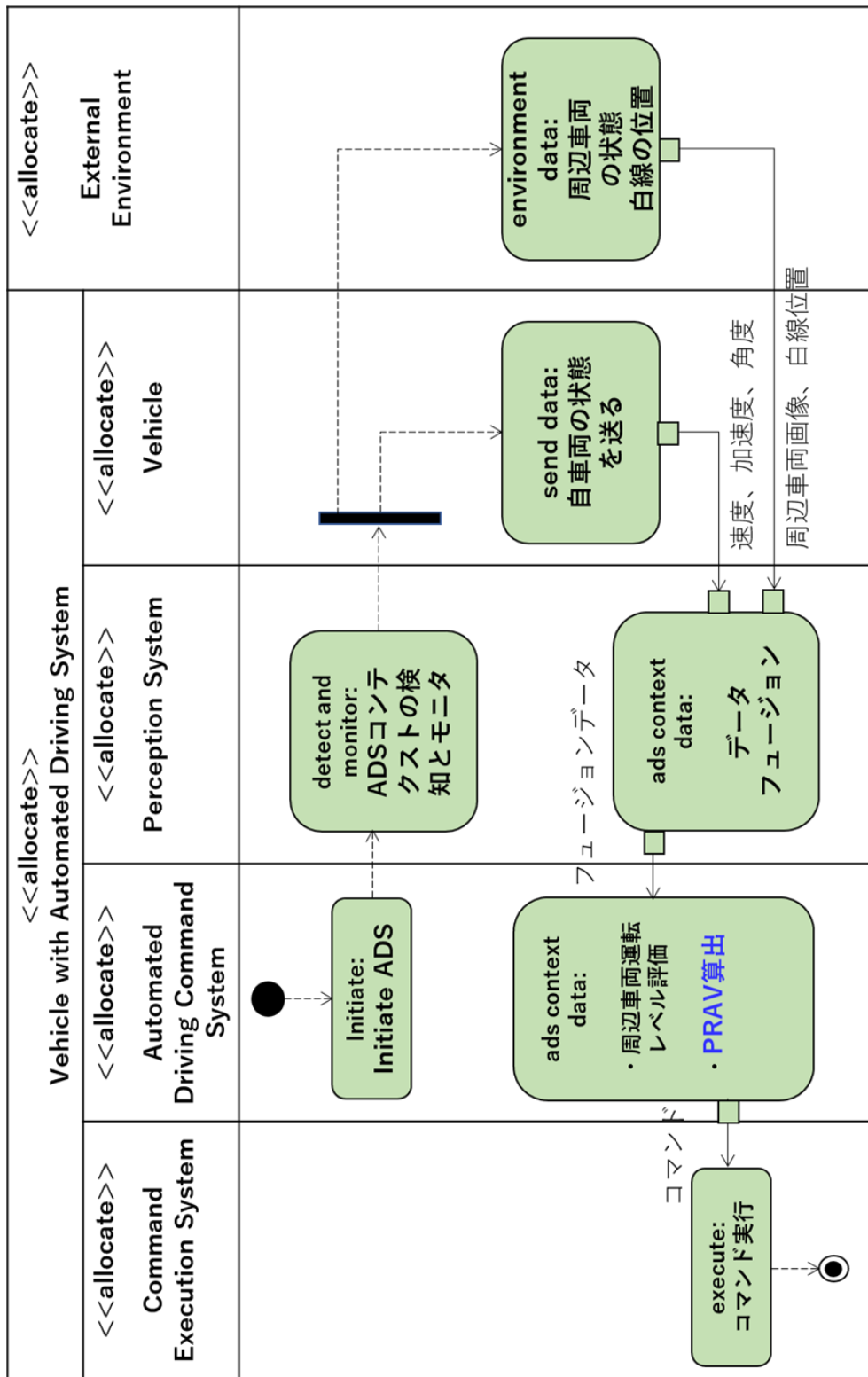


Fig. 25 コンセプトで行う機能の構成要素への割り当て

### 3.2.4 事前準備

#### (周辺車両の運転評価と事前の走行フォーメーションの決定)

Fig.26 (a)~(f)を用いて本コンセプトでの「事前準備」を説明する。Fig.26(a)はある速度で走行中の ADS 搭載の自車 (EV) の前に隣接車線からドライバが運転する車両 A が自車線に入ってくるシーンである。ここで車両 A は方向指示器を動作させず、EV に対して適切な車間距離を設けずに車線変更を行った。この運転行為から車両 A に対しては、「周辺の確認が不十分な運転を行う車両」と EV の ADS が認識する。車両 A は交通環境の急変が発生した場合に反応が遅れ、回避のために急制動、急旋回動作を行う可能性がより高い。Fig.26 (b)にて車両 A の車線変更動作が完了した後、車両 A に対する評価結果に基づいた車間距離  $D_c$  を保つように ADS が EV を制御する Fig.26 (c)。この例においては車両 A の急制動、急旋回に備えて長めの距離を確保した。ノーマル設定  $D_n$  との距離の差が  $D_{ex}$  である。

次に、EV 後方の近接車線から車両 B が自車線に入ってくる。車両 B は EV と適切な距離を保ち、方向指示器で合図を送り、他の周辺車両と干渉の危険も発生させず、交通の流れを乱すことなく、EV との適切な距離を保ったまま車線変更を完了させた Fig.26 (d)(e)。

EV の ADS は車両 B を「周辺の交通状況を確認して運転する車両」と評価し、Fig.26 (f)の状態を保つこととする。仮に、車両 B の運転行為にも問題が認められる場合には、万が一に備えて、車両 A,B の影響が及ばない場所へ移動するために EV の ADS が自車のドライバに車線変更を伴う移動を促すこともあり得る。また、いったん、評価を決定後も周辺車両の観察と評価を継続し、評価結果に応じた走行フォーメーションを随時形成する。

この場において、EV と車両 B との車間距離  $D_f$  は車両 B のドライバにより決定される。

なお、EV による周辺車両の動作の観察は EV に搭載した ADS の構成システム PS を構成するセンサ類 (カメラ、レーダ、Lidar など) によって行う。周辺車両に対しての運転評価結果は周辺車両と紐付けて EV の記録装置に記録する。

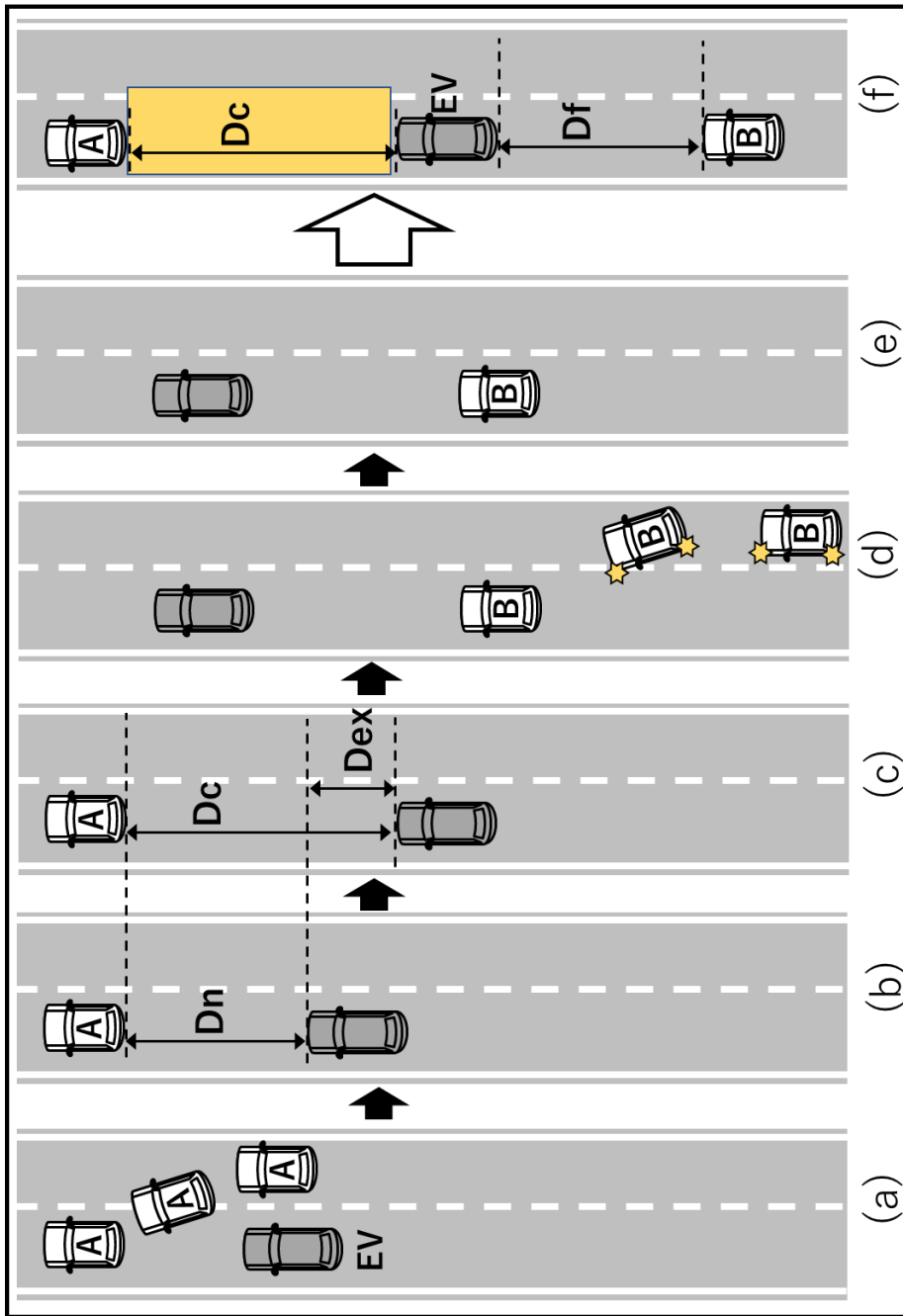


Fig. 26 「事前準備」の実施

### 3.2.5 シナリオの設定と PRAV 完成予想図

高速道路の直線路の走行を前提とし、評価対象となる車両の全周の PRAV を求める。

EV が PRAV を設定する対象の車両を車両 A とする。車両 A に対する運転レベルの評価を終えて、評価結果に基づく設定状態で EV が道路上を走行している。ここで、車両 A は前述の様に運転レベルが低いものとする。道路環境を急変させるトリガイベントが発生し、車両 A により生じるリスクに EV が対処し、その際、EV のドライバーおよび、近くに存在する別の周辺車 B のドライバーが感じるリスクを検証することで車両 A がもたらす影響を考慮した EV が事前準備完了状態で走行する際に避けるべきエリア (PRAV) の有効性について検証する。車両の各部分 (後ろ、前、横、斜め後方) の PRAV を検討するために設定した 4 つのシナリオを使用する。シナリオは EV が最も車両 A から危険回避のために距離をおくべきと考えるものを設定した。

設定した 4 つのシナリオについて概要を述べる。

● シナリオ 1 (車両 A 後方の PRAV)

Fig.27 車両 A の前方に避けるべき障害物があり、車両 A による障害物の発見が遅れたため、車両 A は直前で急操舵により衝突を回避する。

EV の後方には車両 B が走行しており、車両 B は標準的な運転を行うものである。EV が車両 A との距離をどの程度保つかは車両 B のドライバーが感じるリスクを左右すると予測する。

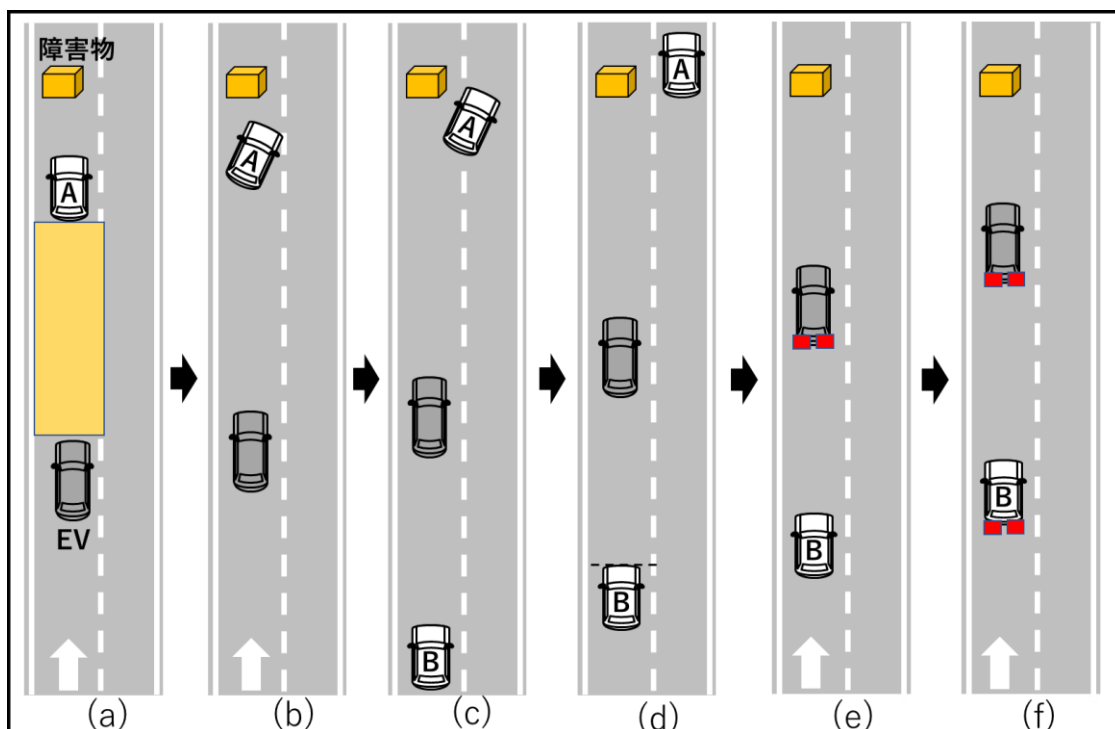


Fig. 27 シナリオ 1 (車両 A 後方の PRAV を評価するためシナリオ)



● シナリオ 2 (車両 A サイドの PRAV)

Fig.28 左側車線を走行する車両 A を EV が右側車線から追い越す。右側車線には EV の後方から車両 B が走行してくる。車両 A のサイドを EV が走行する際の EV、車両 B のドライバーが感じるリスクについて述べる。

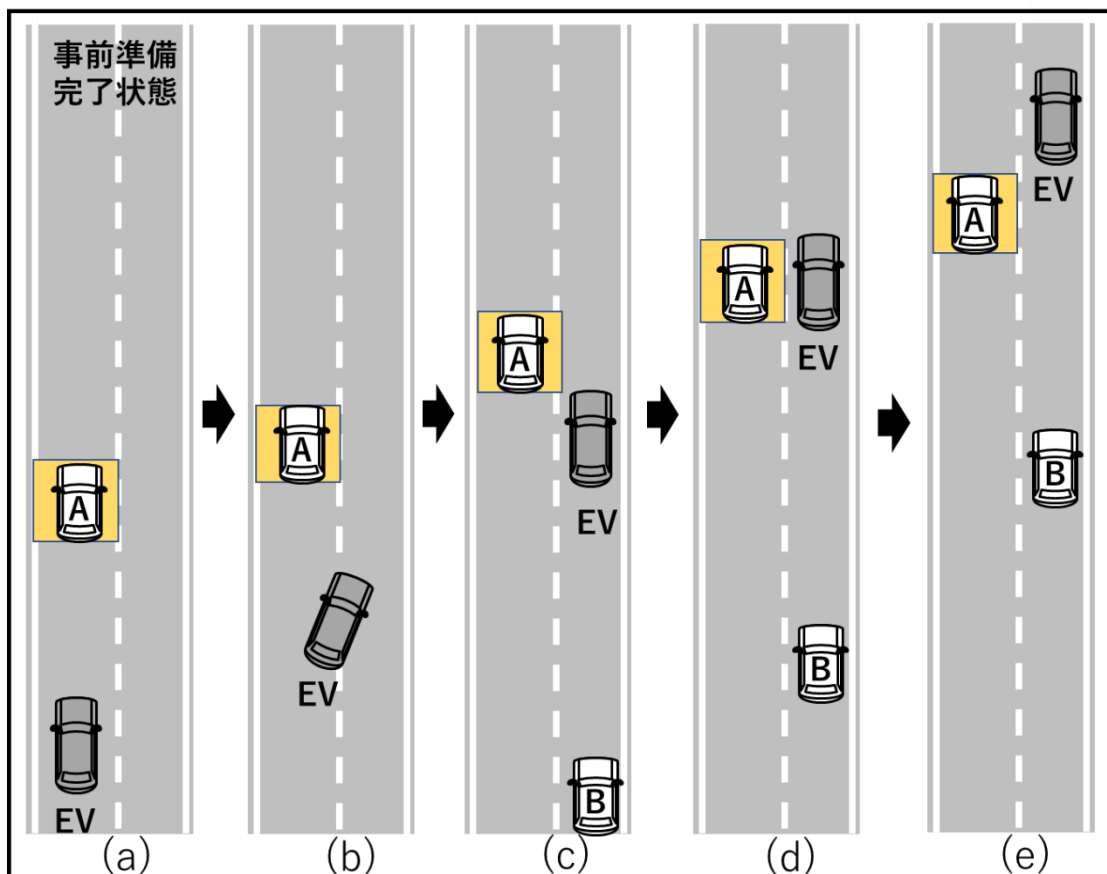


Fig. 28 シナリオ 2 (車両 A サイドの PRAV を評価)

● シナリオ 3 (車両 A 斜め後ろの PRAV)

Fig. 29 EV が車両 A より高速度で走行し車両 A を追い抜こうとする場面で、車両 A が突如、前方の車両 Z を追い越すべく EV が走行する車線へ移動する。EV の後方には車両 B が走行している。EV は車両 A との衝突を回避するために制動を行う。車両 A に対して EV がどの程度の距離にあるかで制動時の EV のドライバーが感じるリスク感が変わり、それに続く車両 B のドライバーが感じるリスク感も左右されると予測する。

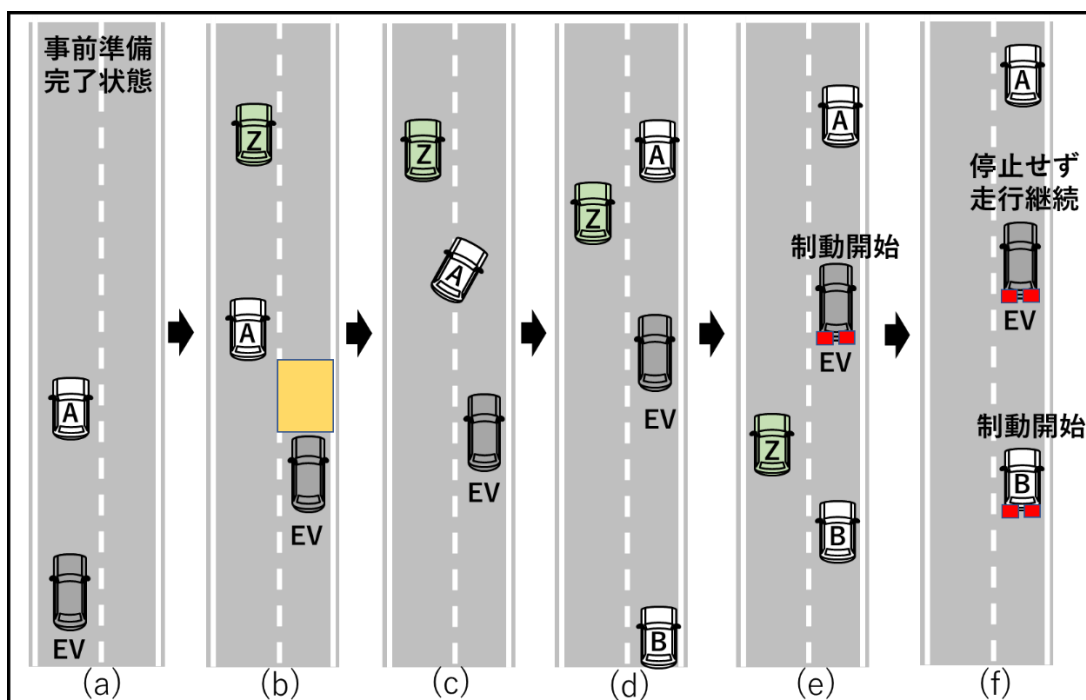


Fig. 29 シナリオ 3 (車両 A の斜め後ろの PRAV 評価)

● シナリオ 4 (車両 A 前方の PRAV)

Fig. 30 事前準備完了状態では車両 A、EV は左側車線を走行している。EV は車両 A の前方を走行している。ADS を搭載する EV がレベル 3 自動運転走行している時に MRM が開始される。EV はハザードランプを点滅させて減速を開始する。車両 A が設定する EV との車間距離は、車両 A がこれに対処して減速をするときに、車両 A のドライバーが感じるリスクの程度に影響すると予測する。

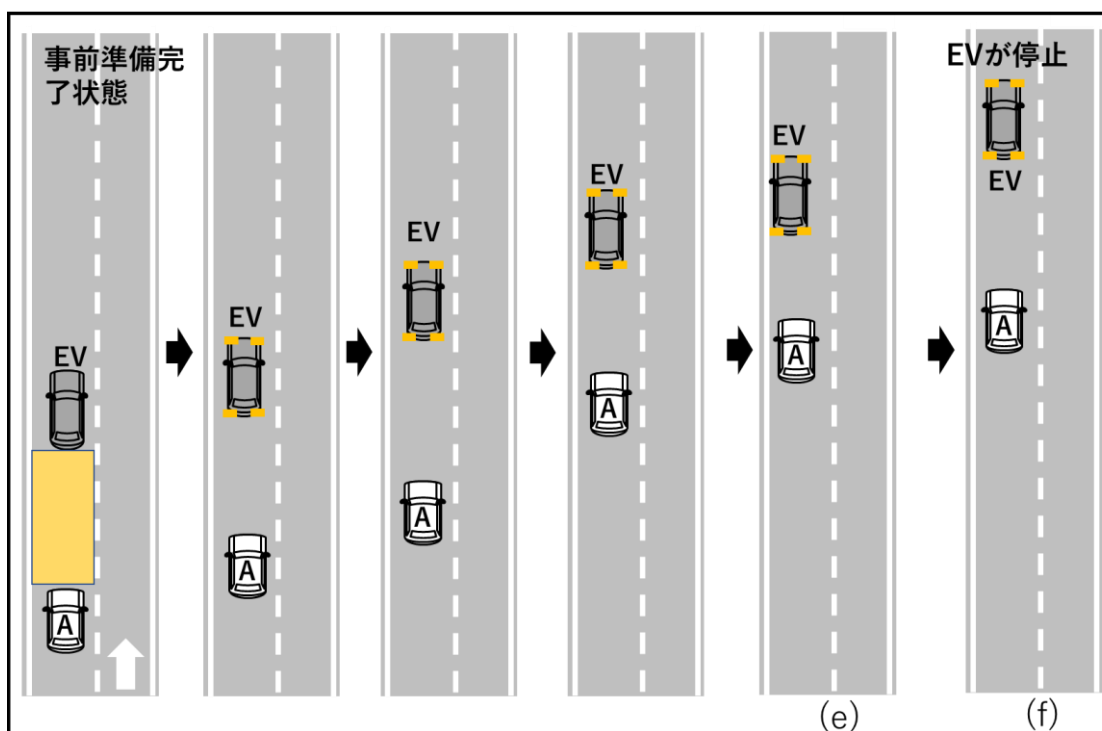
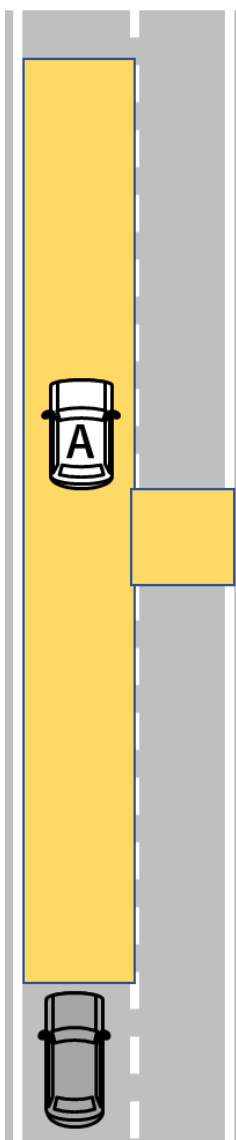


Fig. 30 シナリオ 4 (車両 A の前方の PRAV 評価)

- **PRAV 完成予想図**

4つのシナリオでの評価により、PRAVの完成予想図が Fig.31 のような形状になると予測する。

PRAVの寸法をADS内のメモリにストアして、使用する。



**Fig. 31 PRAV 完成予想図**

## 第4章 評価（リスク低減効果）

本研究では第2章で紹介したリスク評価の指標の中でドライバーのリスク感を示すRF ( $A=4, B=1$ ) 式(1)を使用する。これを用いてEVのドライバー(EVD)、及び、危険回避行動を行うEVの影響を受ける周辺車両(車両B)のRFを算出した。シナリオ4ではMRMを作動させるEVの周辺車として車両AのRFを算出している。

各シナリオにおいて、関係する車両の状態(等速走行、等加速度(減速)走行)毎に各車両の速度、相対速度、車間距離と式(1),(2),(3)から求めている。

### 4.1 車両A後方のPRAV評価(シナリオ1)

Fig.26の事前準備を終えた状態でEVは車両Aの後方を走行している。

Fig 32

- (a) 車両Aのドライバーが前方の障害物に気が付き急旋回での退避行動を開始する。
- (b)(c) 車両Aが退避行動を行う。
- (d) EVのADSが障害物を認識し、制動制御を開始する。
- (e) 反応時間  $T_r$ (s)後にEVが制動を開始する。

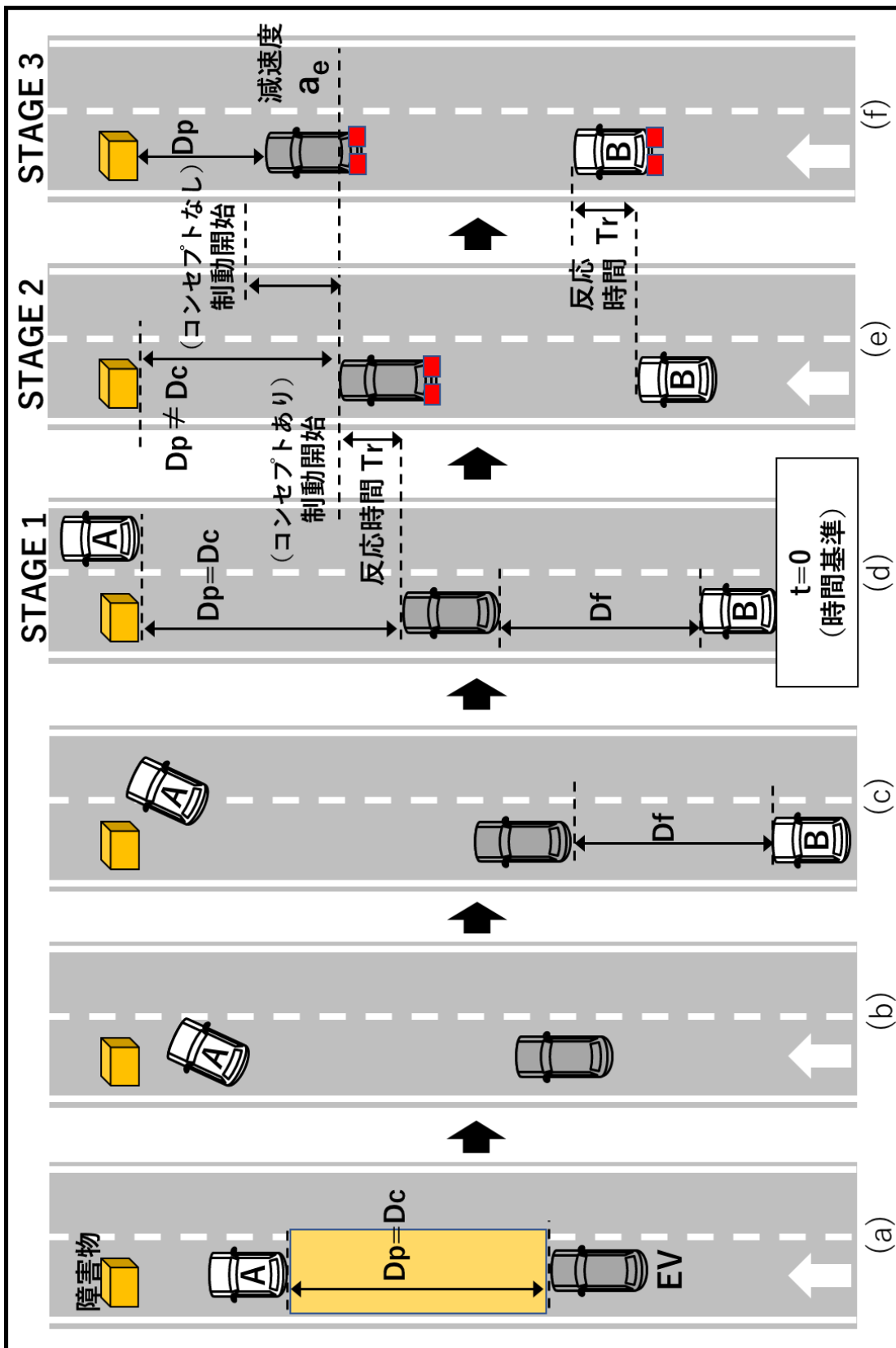


Fig. 32 車両 A 後方の PRAV 検討シナリオの図

#### 4.1.1 障害物出現に対する EVD のリスク感の低減

Fig.33 は Fig.32 (d)のシーンを起点 (時間  $t=0$ ) とした“EV と障害物との距離  $Dp(t)$  の経時変化を示す。

##### 4.1.1.1 EVD が持つリスク感の緩和を考慮した車間距離の設定

Fig.32(d)  $t = 0$  s にて EV の ADS は障害物を認識し制動を行う準備に入る。次に、反応時間  $T_r$  の後に制動が始まる Fig.32(e)。反応時間  $T_r$  では  $t = 0$  s での速度を維持した等速度走行を行う。  $T_r$  の後は減速度  $a_e$  での等加速度運動を行うものとした。

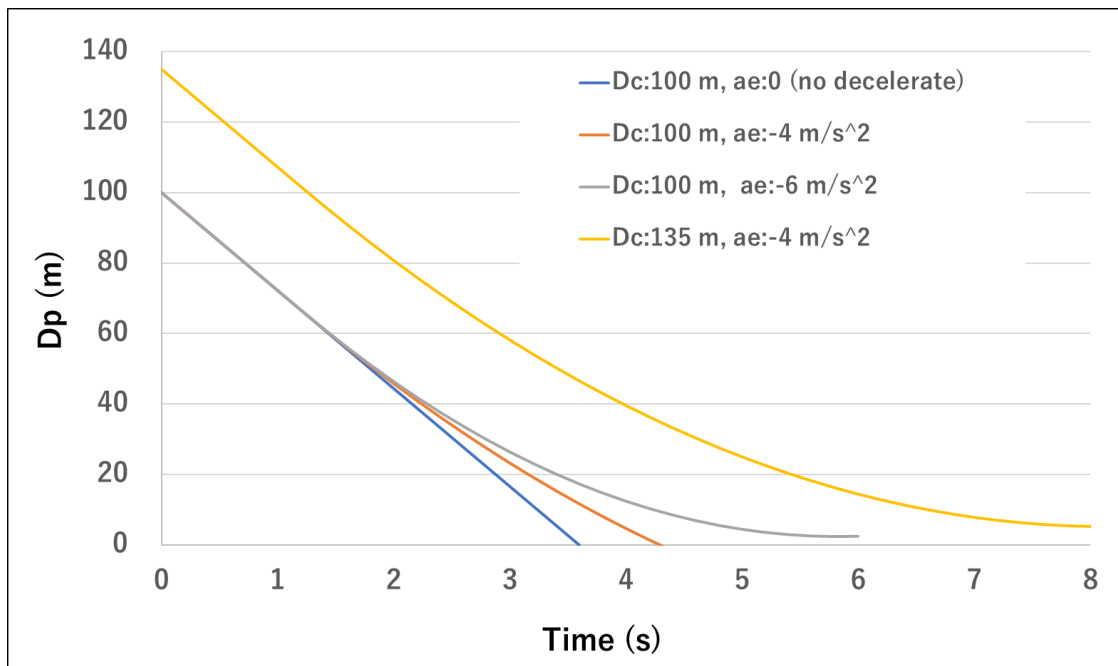


Fig. 33 EV と障害物との距離の経時変化

算出式を以下に示す。

等速度走行区間 ( $t \leq T_r$ )

$$D_e(t) = v_{e0} \times t$$

等加速度走行区間 ( $t > T_r$ )

$$D_e t = v_{e0} \times t - T_r + 1/2 \times a_e \times t - T_r^2$$

EV と車両 A との距離

$$D_p t = D_c - D_e(t)$$

$v_{e0}$  は  $t=0$  における EV の速度であり、高速道路上を想定し、100 km/h とした。  
 $D_c$  は EV の ASD/ADAS が予め設定した車両 A との車間距離である。100 km/h 走行での目安とされる 100 m、及び、135 m を設定した。また、 $T_r$  は平岡らの研究結果 [37] によると、人間のドライバの反応時間 1.2 s とあり、ADS も同等と想定して 1.2 s を使用する。

障害物を発見し反応時間  $T_r$  を過ぎてからの EV の減速度  $a_e$  については  $D_c=100$  m については、0 (ゼロ:減速せず)、 $-4 \text{ m/s}^2$  (少しきつめの制動)、 $-6 \text{ m/s}^2$  (急制動) を設定。

Fig.33 より、初期車間距離である  $D_c$  が 100 m においては急制動により EV は障害物に対して 2.4 m 手前で停車している。しかし、急制動により近距離でようやく停止出来た状態である。本研究では EV のドライバがより安心して心に余裕を持つことを目指す。そのためのマージンとして、 $D_c$  を 135 m とし、プラス 35 m の余裕を設けた。その結果、Fig.33 が示すように、減速度  $-4 \text{ m/s}^2$  (少しきつめの制動) で障害物との距離を 5.2 m 残して衝突せずに停止している。

一般的な目安として知られる、“時速 100 km/h 巡航での車間距離 100 m” に対して、プラス 35 m としたことで、EV ドライバにも余裕が生じたことが表されている。



#### 4.1.1.2 設定した初期車間距離の効果検証

車間距離  $D_c$  の違いによる EV ドライバが持つリスク感の違いを式 (1) で示した RF を用いて表した結果を Fig.34 に示す。障害物と衝突する  $D_c=100\text{ m}$  では EV の RF が急増しており、衝突を回避する 2 つの条件( $D_c=100\text{ m}$  ,  $a_e=-6\text{ m/s}^2$  、  $D_c=135\text{ m}$  ,  $a_e=-4\text{ m/s}^2$ )においても  $D_c = 135\text{ m}$  とした場合は明らかに RF の上昇が抑えられており、効果を確認出来た。

RF は以下を式(1)に代入して求めた。

$$D = D_P(t)$$

$$v_r = v_e t - 0 \quad (\text{障害物の速度 } 0 \text{ を引く})$$

$$v = v_e(t)$$

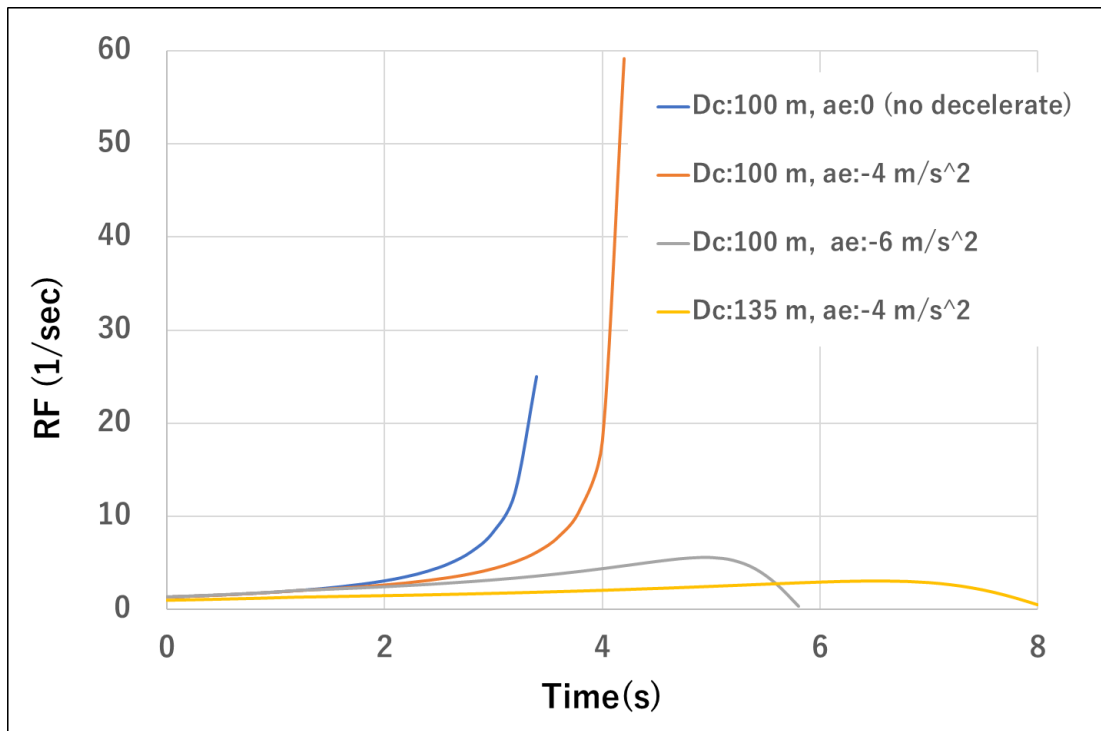


Fig. 34 RF of EVD

## 4.1.2 後続車両のドライバに対するリスク低減の配慮

### 4.1.2.1 後続車両 B の RF 算出

つぎに後続車両 B のドライバが持つリスク感の大きさ RF を求める。

- (STAGE 1)  $t \leq T_r$  EV, 車両 B とともに等速度走行

$$v_e t = v_{e0}, \quad v_b t = v_{b0}$$

$$v_{rbe} t = v_b t - v_a(t)$$

$$D_f t = D_{f0} - v_{rbe} t \times t$$

- (STAGE 2)  $T_r < t \leq 2T_r$  EV : 等加速度走行、車両 B : 等速度走行

$$v_e t = v_{e0} + a_e \times t - T_r, \quad v_b t = v_{b0}$$

$$v_{rbe}(t) = v_b t - v_a(t)$$

$$D_f t = D_{f0} - v_{rbe} t \times t$$

$t$ における、EV の車両後端の位置

$$S_e t = v_{e0} \times T_r + v_{e0} \times t - T_r + 0.5 \times a_e \times (t - T_r)^2$$

$t$ における、車両 B の先端の位置

$$S_b t = v_{b0} \times T_r + v_{b0} \times t - T_r = v_{b0} \times t$$

$$D_f t = S_e t - S_b(t)$$

- (STAGE 3)  $2T_r < t$  EV, 車両 B とともに等加速度走行

$$v_e t = v_{e0} + a_e \times t - T_r, \quad v_b t = v_{b0} + a_b \times (t - 2T_r)$$

$$v_{rbe} t = v_b t - v_e(t)$$

$$\begin{aligned} S_e t &= v_{e0} \times T_r + v_{e0} \times t - T_r + 0.5 \times a_e \times (t - T_r)^2 \\ &= v_{e0} \times t + 0.5 \times a_e \times (t - T_r)^2 \end{aligned}$$

$$S_b t = v_{b0} \times 2T_r + v_{b0} \times t - 2T_r + 0.5 \times a_b \times (t - 2T_r)^2$$

$$D_f t = S_e t - S_b(t)$$

各 STAGE において、式(1),(2),(3)にそれぞれ、相対速度  $v_{rbe}(t)$ 、車間距離  $D_f(t)$ を代入して、RF を求める。

#### 4.1.2.2 算出した RF に対する考察

後続車である車両 B の RF 算出結果を Fig.35 に示す。Fig.32(e)を起点としたものである。

「 $D_c = 135 \text{ m}$   $a_e = -6 \text{ m/s}^2$ 」(CASE1)と「 $D_c = 135 \text{ m}$   $a_e = -4 \text{ m/s}^2$ 」(CASE 2)について求めた結果をグラフにしたものである。

車両 B はどちらの条件においても、反応速度  $T_r$  後は  $-4 \text{ m/s}^2$  で等加速度走行をするとし、EV との間に車両 B のドライバの判断により  $100 \text{ m}$  の車間距離を維持していたことを前提としたものである。結果、CASE 1 は RF が大きく、CASE2 は RF が小さいままに抑えられている。

これは、EV の加速度(減速)  $a_e$  の違いによるものであり、さらに、EV と車両 B の加速度の差によるものである。CASE 1 では車両 B の制動が始まり等加速度走行に移行してからも EV がより強く減速しているため、EV と車両 B との距離  $D_f$  が縮まり最終的に衝突に至ることから RF が高い値に到達している。一方、CASE2 では車両 B が制動による等加速度走行に移行してから EV と車両 B が同じ加速度  $a_e = -4 \text{ m/s}^2$  で減速している。このため、車両 B が減速を開始する前の EV との速度差が維持され、車両 B の速度が広がらないことから衝突に至らず車両 B のドライバの RF が小さく抑えられている。

このことから分かるのは、車両 B のドライバの RF を小さく抑えるために必要なことは、車両 B があまり強い減速を行わずに対処出来るための配慮をするために以下である。

EV は車両 B より強い減速をしないこと。EV が強い減速をすると車両 B との距離をより縮めてしまう。(EV が車両 B と同程度かそれより緩い減速度であれば車両 B ドライバの RF が低減する。)

→EV の減速度  $a_e$  は緩い方がよい

→EV が緩い減速度  $a_e$  で障害物との衝突を避けるには、予め  $D_c$  を大きく設定しておくのがよい。

EV と車両 A の準備後の設定距離( $D_c$ )違いでの車両 B のドライバの RF を Fig.36 に示す。

RF に違いはなく、車両 B のドライバの RF に対しては、EV と車両 A との初期の車間距離は直接には関係しない。しかし、EV の加速度は影響する。そして、EV がより小さな加速度(緩い減速)で対応するためには、 $D_c$  が広くとられていることが必要となる。

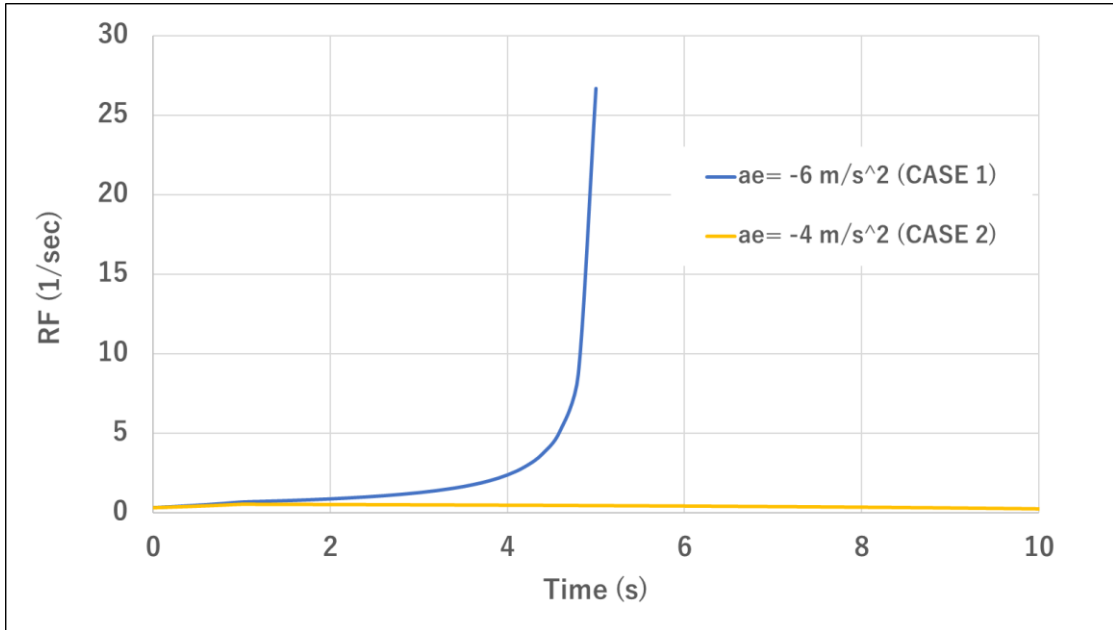


Fig. 35 EV の減速度違いの車両 B ドライバ RF ( $D_c=135$  m,  $a_b=-4$  m/s<sup>2</sup>)

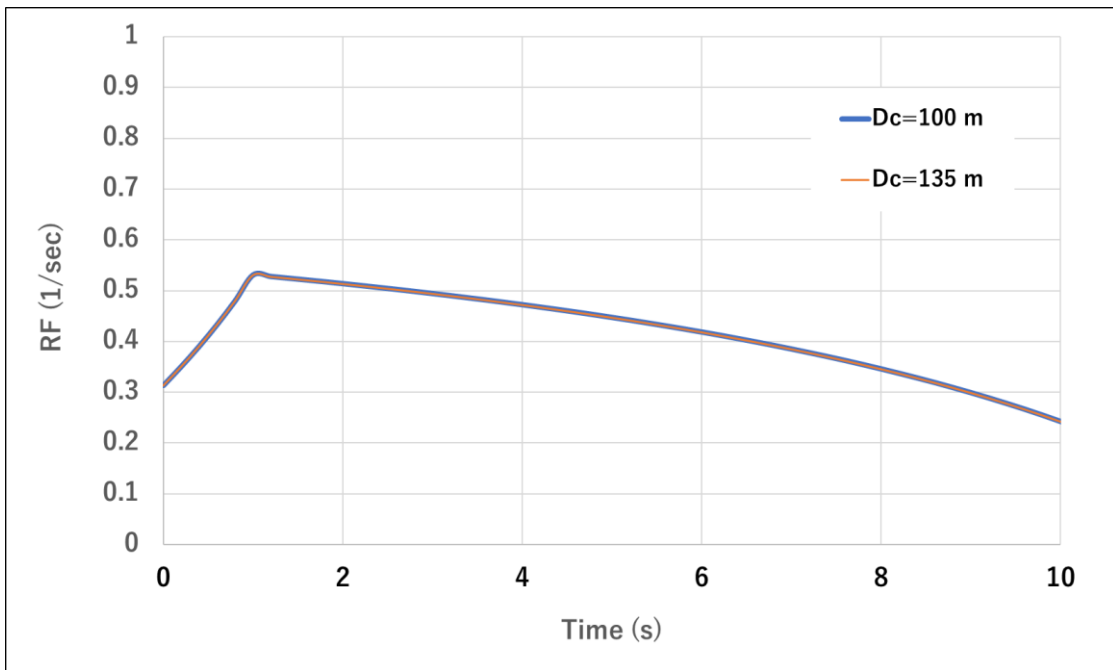


Fig. 36 EV と車両 A 車間距離 違いの車両 B ドライバの RF ( $a_c=a_b=-4$  m/s<sup>2</sup>)

車両 B のドライバーの RF を抑えるために必要な条件は以下になる。  
 車両 B が減速走行を行う STAGE 3 ( $t > 2T_r$ ) においては EV、車両 B とともに減速走行を行う。  
 このとき、EV が車両 B よりも強い制動を行うと、STAGE 2 終了時点よりもさらに EV と車両 B の速度差が広がり、車両 B が EV に 2 次曲線的に接近する。そして、EV と車両 B の距離が縮まり車両 B のドライバーの RF が高まることになる。車両 B の RF の高まりを抑えるためには、STAGE 3 での EV の加速度が車両 B の加速度より低い値にならないようにすることが条件となる。

STAGE 3 において以下であること。

$$a_e \geq a_b \quad (a_e < 0, a_b < 0)$$

### 4.1.3 車両 A の後方 PRAV の算出式の導出

車両 A の後方の PRAV 設定値の算出について道程と共に示す。

Fig.25 (d)に示すように EV が車両 A に対して設定していた車間距離  $D_e$  が、EV が障害物を発見してから衝突するまでの距離となる。この距離を数式で表現する。

Fig.25 (d)~(f)について述べる。この区間を EV、車両 A、車両 B の走行モードの違いから 3 つの STAGE とし、STAGE 1、2、3 とする

#### STAGE 1 :

EV は速度  $v_{e0}$  で等速度走行を行う。走行する時間は ADS の反応時間  $T_r$ 。この間に EV が走行する距離は以下となる。

$$D_{e1} = v_{e0} \times T_r$$

#### STAGE 2、及び STAGE3 :

EV は等加速度走行を行う。この区間の EV の走行距離は以下である。

$$D_{e23} = v_{e0} \times t - T_r + 0.5 \times a_e \times (t - T_r)^2$$

$D_{e1}$ 、 $D_{e23}$  の合計 は以下となる

$$\begin{aligned} D_{e1} + D_{e23} &= v_{e0} \times t + 0.5 \times a_e \times t^2 - T_r \times v_{e0} \\ &= 0.5 \times a_e \times t^2 + v_{e0} \times t - a_e \times T_r \times t + 0.5 \times a_e \times T_r^2 \end{aligned}$$

この式を以下のように表す。

$$D_e \times t = A \times t^2 + B \times t + C \quad (4)$$

$$t = -B \div 2 \times A = -(v_{e0} - a_e \times T_r) \div 2 \times (1 \div 2 \times a_e) \quad (5)$$

で  $D_e$  は最大値  $-F \div 4A$  となる。

$$\begin{aligned} F &= B^2 - 4 \times A \times C = (v_{e0} - a_e \times T_r)^2 - 4 \times 0.5 \times a_e \times 0.5 \times a_e \times T_r^2 \\ &= v_{e0} \times (v_{e0} - 2 \times a_e \times T_r) \end{aligned}$$

$D_e$  の最大値  $D_e \max$  は

$$D_e \max = -F \div 4A = -1 \div (4 \times 0.5 \times a_e) \times v_{e0} \times (v_{e0} - 2 \times a_e \times T_r)$$

これより、

$$D_e \max = -v_{e0} \div 2a_e(v_{e0} - 2a_e \times T_r) \quad (6)$$

式(6)による  $D_e$  の計算結果をグラフにしたものを Fig.37 に示す。

式(5)、(6)より  $t = 8.15 \text{ sec}$  において、 $D_e$  は最大値  $129.8 \text{ m}$  となる。

$t = 8.15 \text{ sec}$  を超えると  $D_e$  が短くなるが、これは EV が逆走を示しており、現実には起こりえない。ここで、 $v_{e0} = 100 \text{ km/h}$  ( $27.8 \text{ m/s}$ )、 $a_e = -4 \text{ m/s}^2$  とした。

これは日本の高速道路上を走行中、障害物を発見し、急ブレーキとまではいかない、強

めの制動で対処することを想定したものである。

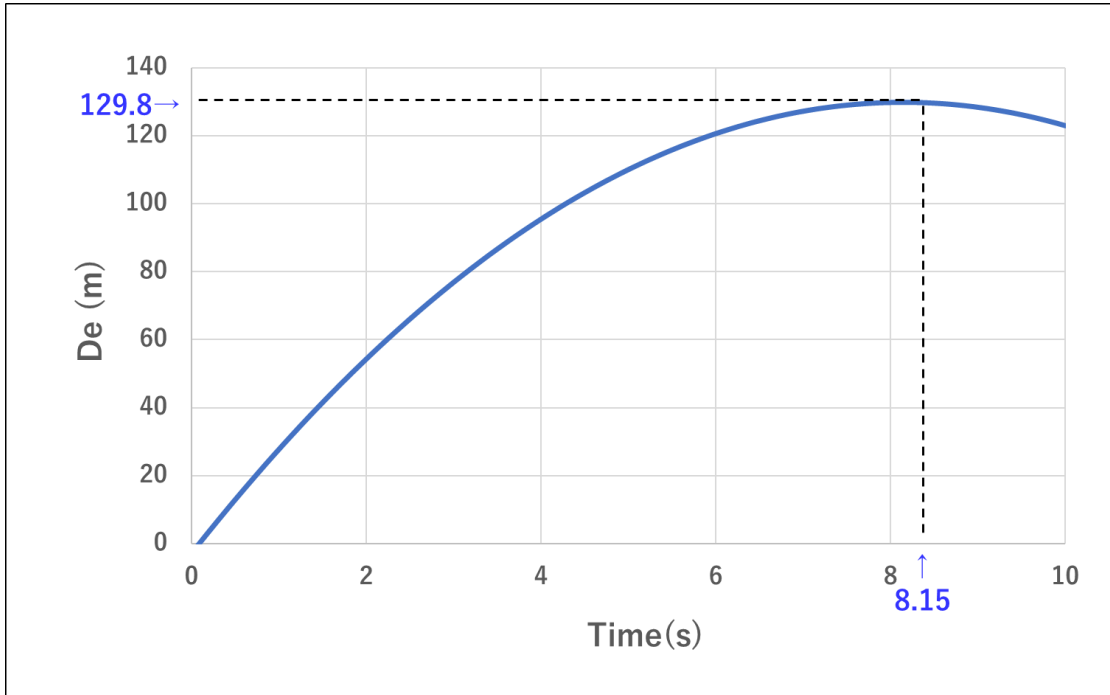


Fig. 37 EV の時間経過における走行距離 ( $v_{e0}=100$  km/h、 $a_e=-4$  m/s<sup>2</sup>、 $T_r=1.2$  s)

この図が示すことはこの条件において、車両 EV が障害物を発見してから静止するまでに必要な距離が 129.8 m であり、式(6)で算出されるということである。そして、Fig.32 に示した  $D_c$  を式(6)で求めた値以上に設定すれば、EV は操舵をせずに制動のみで衝突を回避可能となる。

Fig.34 において、 $D_c = 135$  m の時に、 $a_e = -4$  m/s<sup>2</sup> で減速すると EV のドライバの RF が抑えられることはこれに一致する。ただし  $D_c = 130$  m では EV は停止時に障害物との距離が衝突寸前であるため、EV ドライバの RF は上昇することから、衝突を避けて、さらに EV ドライバの RF の上昇を抑えるためには  $+\alpha$  の余裕を持つことが必要で、このシナリオでは、5 m で Fig.34 の結果となった。

次に、EV の後続車両である車両 B のドライバがもつリスク感を考慮する。

4.1.2.2 章にて STAGE 3 で車両 B が減速する時に車両 A がそれ以上に大きな減速度（小さな加速度）で減速すると EV と車両 B がより短時間で接近することになり、車両 B のドライバが持つリスク感の上昇につながることを述べた。

このことから式(6)に次の条件を追加し、車両 A 後方の PRAV を以下のように定義する。

このシーンで想定したシビアな状況においても車両 A、B が共に極力、急制動を用いることなくドライバが余裕をもって対処出来ることを狙い、両車とも減速時の加速度  $a_e$ 、 $a_b$  を  $-4$  m/s<sup>2</sup> 以上とする（緩やかな減速とする）

$$PRAV_{Rear} = -v_{e0} \div 2a_e(v_{e0} - 2a_e \times T_r) + \alpha \quad (7)$$

$$\text{かつ、 } a_e \geq a_b (-4 \text{ m/s}^2 \leq a_e < 0, \quad -4 \text{ m/s}^2 \leq a_b < 0)$$

+  $\alpha$ は EV が停止する際に衝突せず、かつ、EV のドライバーの RF を抑える場合に設定する。本シナリオでは高速道路上で巡航速度 100km/h の場合に +  $\alpha$ は 5 m とした。

Mobileye Shwartz らの研究論文 [39]の P7 で導出されている式では先行車の減速度、後続車 (EV) の減速度が項目に入っているが、設定したシナリオの違いから本研究とは異なる式が導出されている。Shwartz らの研究では先行車の後に後続車が後に続くものであることから先行車の速度、減速度が式に含まれるが、本研究でのシナリオは静止した障害物が EV の目前に現れるという、より厳しい状況を想定した。



## 4.2 車両 A サイドの PRAV 評価 (シナリオ 2)

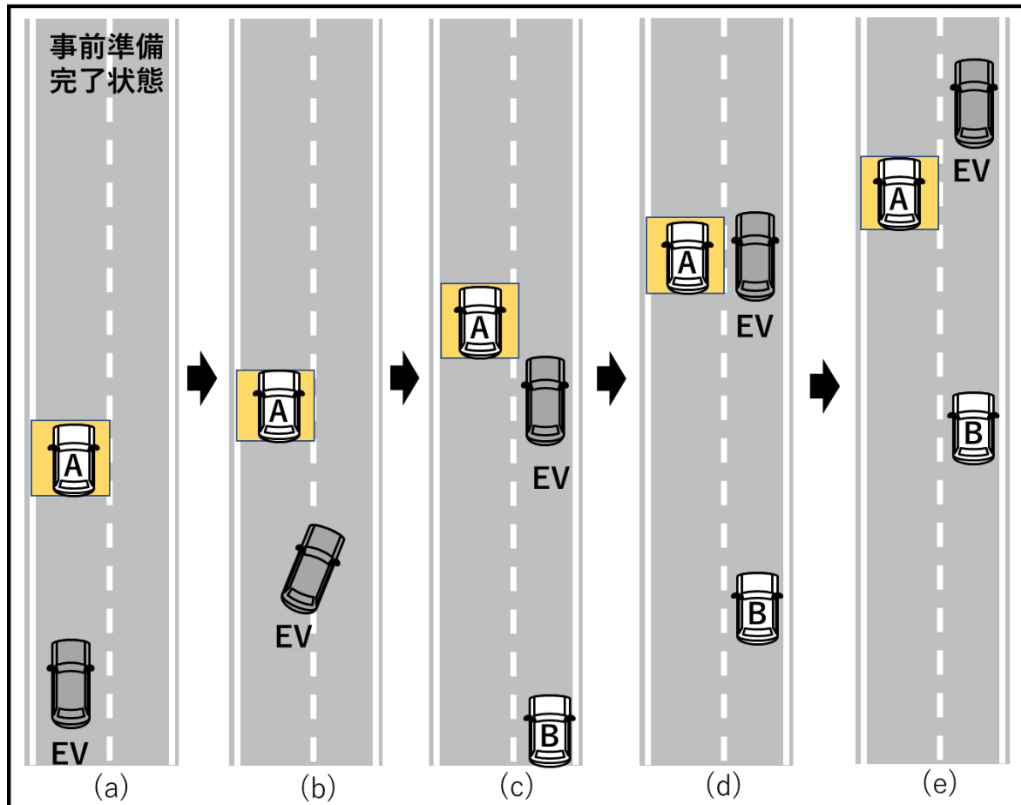


Fig. 38 車両 A サイドの PRAV 検討シナリオの図

Fig.26 の事前準備を終えた EV は車両 A の後方を走行している。

Fig 38

- (a) 左側車線を車両 A の後方を EV が走行している。  
(EV は車両 A の運転レベルを評価済み)
- (b) EV が車両 A を追い抜くために右側車線に移動を開始
- (c) EV が右側車線に移動完了。車両 A の斜め後方に位置。  
EV の後方を車両 B が走行している。
- (d) EV が車両 A の隣に並ぶ。
- (e) EV が車両 A を抜き去る。

車両 A が速度  $v_a = 100 \text{ km/h}$  で巡航し、Fig.38 (c)~(e)の EV の速度を  $v_e = 110 \text{ km/h}$  とすると速度差は

$$v_{rea} = v_e - v_a = 10 \text{ km/h} (\div 2.78 \text{ m/s})$$

である。車両 A、EV の全長を標準的な乗用車として  $5\text{m}$  とすると、Fig.38(c)~(e)での車両 A を基準とした EV の移動距離は両車の全長を加算した ( $5 \text{ m} \times 2$ )。Fig.38 (c)~(e)の時間、つまり、EV が車両 A の側方に位置する時間は

$$t = 10 \text{ (m)} \div 2.78 \text{ (m/s)} = 3.6 \text{ (s)}$$

である。その間、EV のドライバーの前方の視界は開けており、リスクは感じないものと考え、EV は車両 A に対して車線をまたいで接近しなければ良いと考える。

### 4.3 車両 A の斜め後方の PRAV 評価 (シナリオ 3)

Fig 39

- (a) Fig.26 の事前準備を終えた状態で車両 A の後方を EV が走行している。
- (b) EV が車線を変えて車両 A の速度  $v_a$  より速い速度  $v_{e0}$  で右側車線を走行している。
- (c) 車両 A のドライバーが車両 Z を追い抜く際に、周囲確認をせずに、かつ、方向指示器を使わずに EV の前で右側車線への車線変更を開始する。
- (d) 車両 A:急操舵で瞬時に車線変更を完了し、追い越し車線を走行する EV の前に現る。  
EV : 制動の準備を始める。  
車両 B : EV の後方を走行している。
- (e) EV : (d)から反応時間  $T_r$  (s)の後に制動が開始する。  
車両 B:EV のストップランプ点灯に反応して制動の準備を開始する。
- (f) 車両 A:減速継続  
車両 B:(e)から反応時間  $T_r$  (s)後に制動が開始する。

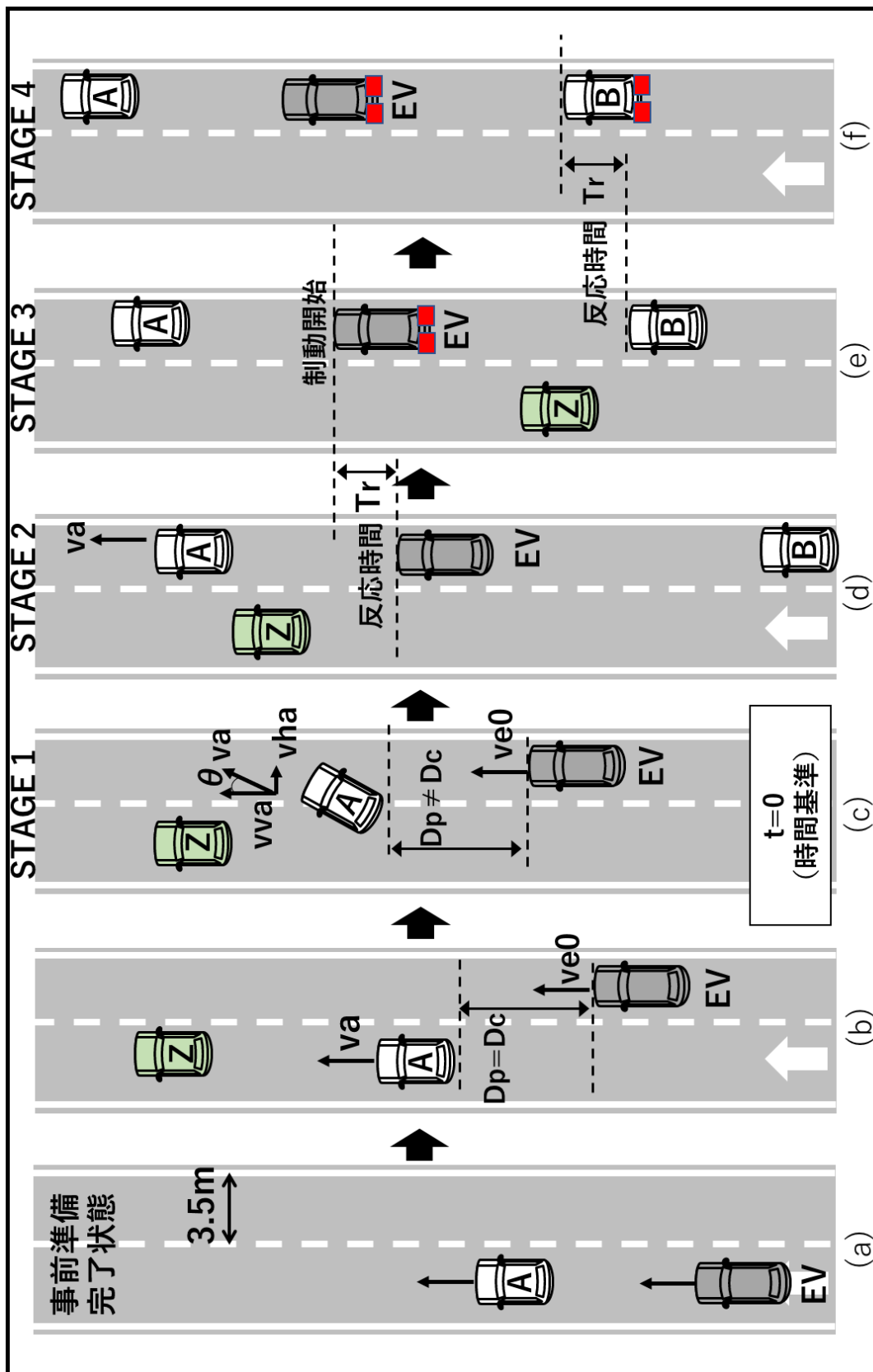


Fig. 39 車両 A 斜め後方の PRAV 検討シナリオの図

車両 A と EV に関連した記号

EV と車両 A との距離 (車線進行方向)	$D_p$	m
$D_p$ の初期値 (車両 A の評価で EV が設定)	$D_c$	m
EV と車両 A との相対速度 (車線直進方向)	$v_{rea}$	m/s <sup>2</sup>

EV に関連した記号

EV の速度	$v_e$	m/s <sup>2</sup>
ve の初期値	$v_{e0}$	m/s <sup>2</sup>

車両 A に関連した記号

進行角度	$\theta$	deg	
速度	車体進行方向	$v_a$	m/s <sup>2</sup>
	車線直進方向	$v_{va}$	
	車線直交方向	$v_{ha}$	

車両 B と EV に関連した記号

EV と車両 B との距離 (車線進行方向)	$D_{eb}$	m
$D_{eb0}$ の初期値	$D_{eb0}$	m
EV と車両 b との相対速度 (車線直進方向)	$v_{rbe}$	m/s <sup>2</sup>
各車両の制動前の反応時間 (制動意志を持ってから実際に制動開始するまでの時間)	$T_r$	s

車両 B に関連した記号

車両 B の速度	$v_b$	m/s <sup>2</sup>
$v_b$ の初期値 $t_2=0$ (時間基準 2)における	$v_{b0}$	m/s <sup>2</sup>

共通

各車両の制動前の反応時間 (制動意志を持ってから実際に制動開始するまでの時間)	$T_r$	s
1 車線の道幅	$w$	m

### 4.3.1 前方に現れた車両 A に対する EVD のリスク低減

Fig.40 は Fig.39(c)のシーンを起点 (時間  $t = 0$ ) とした時の“EV と車両 A との距離  $Dp(t)$  の経時変化を示す。

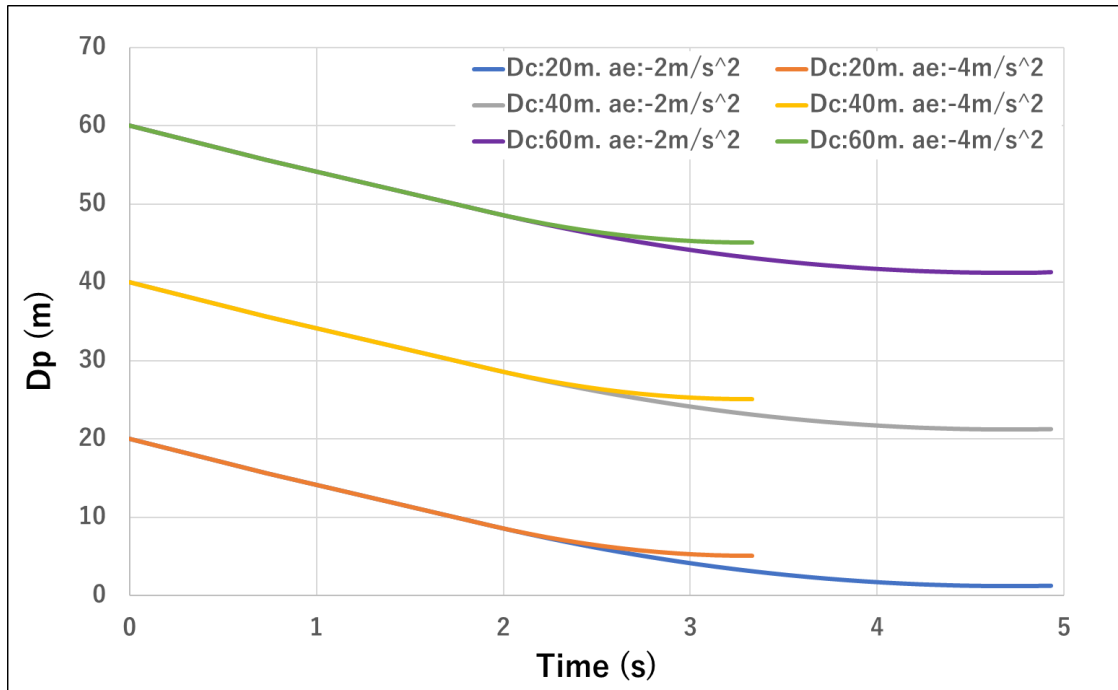


Fig. 40 車両 A が車線変更開始後の車両 A と EV との距離の変化 (初期の Dc 違い)

算出式を以下に示す。

**STAGE1** ---車両 A 車線変更中 Fig.39 (c)

EV:  $v_{e0}$  で等速度走行、車両 A:  $v_a$  で等速度走行

車両 A の車線変更開始から終了までにかかる時間  $t_{s1}$

$$t_{s1} = w \div v_{ha}$$

$w$  : 車線幅 (m)

車線進行方向距離として、道幅分を移動して車線変更を完了すると想定。

また、高速道路上を前提とし、道幅 3.5 m、 $v_a = 100$  km/h (27.8 m/s)、 $\theta = 10$  deg に設定。

$$v_{ha} = v_a \times \sin \theta = 4.82 \text{ m/s}$$

$$t_{s1} = 3.5 \div 4.82 = 0.73 \text{ s} \quad (\text{STAGE 1 の時間})$$

EV と車両 A の相対速度

$$v_{rea} = v_{e0} - v_{va} = v_{e0} - v_a \times \cos \theta$$

時間  $t$  における EV と車両 A との距離  $D_p(t)$

$$D_p t = D_c - v_{rea} \times t = D_c - (v_{e0} - v_a \times \cos\theta) \times t$$

$$v_{e0} = 120\text{km/h} = 33.3 \text{ m/s}^2 \quad \text{と想定}$$

**STAGE 2** ---EV が車両 A 車線変更中 Fig.39 (d)

EV:  $v_{e0}$  で等速度走行、車両 A:  $v_a$  で等速度走行

EV の反応時間  $T_r$  (s) の間、行われる。

$$D_p t = D_c - v_{rea} \times t = D_c - (v_{e0} - v_a) \times t$$

**STAGE 3,4 及び、それ以降** ---EV が制動開始 Fig.39 (e),(f)

EV:  $a_e$  で等加速度走行、車両 A:  $v_a$  で等速度走行

$$v_e = v_{e0} + a_e \times t$$

$$v_{rea} t = v_e - v_a = v_{e0} + a_e \times t - v_a$$

$v_{rea}$  で進む距離

$$D_r t = v_{rea0} \times t + 0.5 \times a_e \times t^2$$

EV と車両 A との距離

$$D_p t = D_{p1} - D_r(t)$$

$D_{p1}$ : STAGE 1 終了時点の  $D_p$  の値

#### 4.3.1.1 EVD が持つリスク感の緩和を考慮した車間距離の設定

Fig.41 は Fig.39(c)のシーンを起点 (時間  $t=0$ ) とした EV のドライバーが感じる RF の変化を示したものである。

式 (1), (2), (3)より上記の  $v_{rea}$ ,  $D_p(t)$ を使用して求めたものであり、自車両に EV の値、先行車として車両 A の値を使用する。

EV のドライバーの RF は車両 A の運転レベルを評価して設定した  $D_c$  と EV の加速度 (減速) の影響を受ける。

$D_c = 20\text{ m}$  では EV と車両 A との距離が  $5.1\text{ m}$  ( $a_e = -4\text{ m/s}^2$ )、 $1.3\text{ m}$  ( $a_e = -2\text{ m/s}^2$ )まで接近するため、EVD の RF 値が顕著に高く、衝突の危険を感じるレベルにあると考えられる。 $D_c$ を  $40\text{ m}$  と  $60\text{ m}$ にした場合、RF 値の差はあるが、 $D_c=40\text{ m}$ でも RF 値は 2 程度までに抑えられ、その上昇も緩やかとなっている。EV は Fig.39(b)の状態 で車両 A に対して走行する場合には、 $D_c$ を  $40\text{ m}$ 以上に設定し、車両 A に  $40\text{ m}$ 以内に近づいた場合には注意深く制御を行うことが必要となる。例えば、それは、 $40\text{ m}$ 以内に近づかない様にするのであったり、または、 $40\text{ m}$ 以内に近づく場合には、車両 A が突然の車線変更で EV の直前に割り込んで来ることを想定して速度を落としたりということも考えられる。または、車両 A の真横はリスクが低いエリアであることから、 $D_p < 40\text{ m}$ のエリアを速やかに通り抜けてリスクに遭遇する確率を低くする等の方法も選択としてあり得るかもしれない。このようにリスクエリアを把握しておくことが出来れば、それに対処するための方法を考えることが出来る。

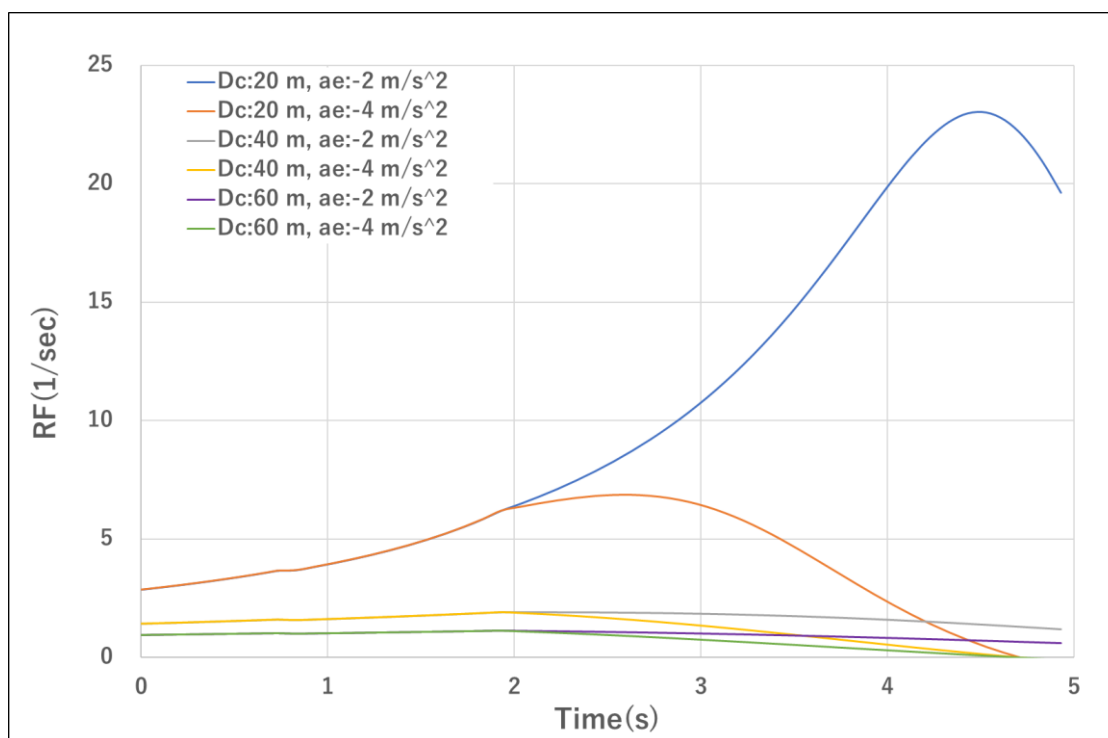


Fig. 41 RF of EVD

### 4.3.2 後続車両のドライバーに対するリスク低減の配慮

EV と車両 B について検討するために Fig.42 の STAGE3 を時間基準  $t_2=0$  (s) とする。

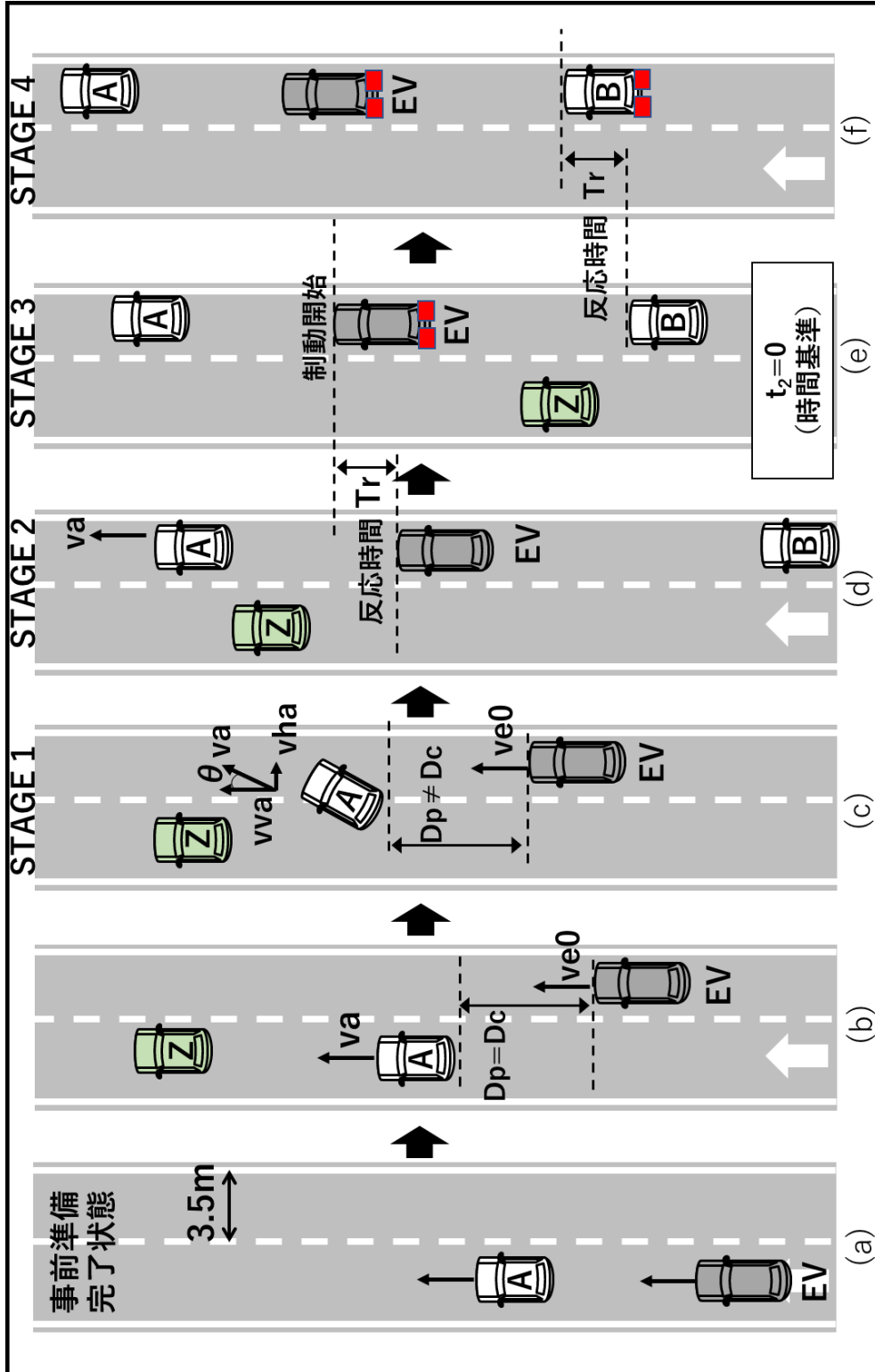


Fig. 42 EV と車両 B の運動の関係図



### 4.3.2.1 後続車両 B の RF 算出

式(1),(2),(3)の車間距離、相対速度にそれぞれ、以下で求まる  $D_{eb}(t_2)$ ,  $v_{rbe}(t_2)$ を代入して、RF を求める。

**STAGE 3**---車両 B が車両 EV の減速動作に気が付き、減速の準備開始 Fig.42 (e)  
EV:  $a_e$  で等加速度走行、車両 B:  $v_{b0}$  で等速度走行 ( $T_r$ の間)

$$v_{rbe} t_2 = v_{b0} - v_e(t_2)$$

$$v_e t_2 = v_{e0} + a_e \times t_2 \quad (t_2 \leq T_r)$$

$$D_{eb} t_2 = D_{eb0} - v_{rbe} t_2 \times t_2 \quad (t_2 \leq T_r)$$

$$D_{eb0} = 120 \text{ m (車両 B のドライバーによって設定される)}$$

**STAGE 4** ---車両 B が  $T_r$ の反応時間を終えて制動を開始 Fig.42 (f)  
EV は引き続き  $a_e$  で等加速度走行  
EV:  $a_e$  で等加速度走行、車両 B:  $a_b$  で等加速度走行

$$v_{rbe} t_2 = v_{v0} - v_e(t_2)$$

$$v_{b0} = 120 \text{ km/h}(=33.3 \text{ m/s})\text{に設定}$$

$$v_e(t_2) : \text{上記 STAGE 3 の式と同じ}$$

$$D_{eb} t_2 = D_{eb} T_r - v_{rbe}(t_2) \times t_2$$

$$D_{eb}(T_r) : \text{STAGE 3 終了時点の } D_{eb}(t_2)\text{の値}$$

### 4.3.2.2 算出した RF に対する考察

- 車両 B の減速度が車両 B のドライバーのリスク感にもたらす影響

車両 B のドライバーが感じるリスク感について、式(1), (2), (3) で求めた RF で示す。Fig.43 は Fig.42 (e)からの車両 B のドライバーの RF をグラフにしたものであり、車両 B に対して先行する EV の減速度を  $-2 \text{ m/s}^2$  に固定して、車両 B が行う制動の違い、つまり、車両 B の減速度の違いが車両 B のドライバー自身に与える RF を表したものである。ここで、EV が車両 A に対して予め設定した車間距離は  $D_c = 20 \text{ m}$  としている。 $a_b$  は車両 B の加速度である。マイナスであることから、「減速度」と文章中で表現する。 $a_b = 0$ 、つまり、車両 B が減速しない場合には車両 B は EV と衝突するため、車両 B のドライバーの RF が上昇しており  $a_e = -4 \text{ m/s}^2$  で減速した場合には車両 B のドライバーの RF は上昇することがない。

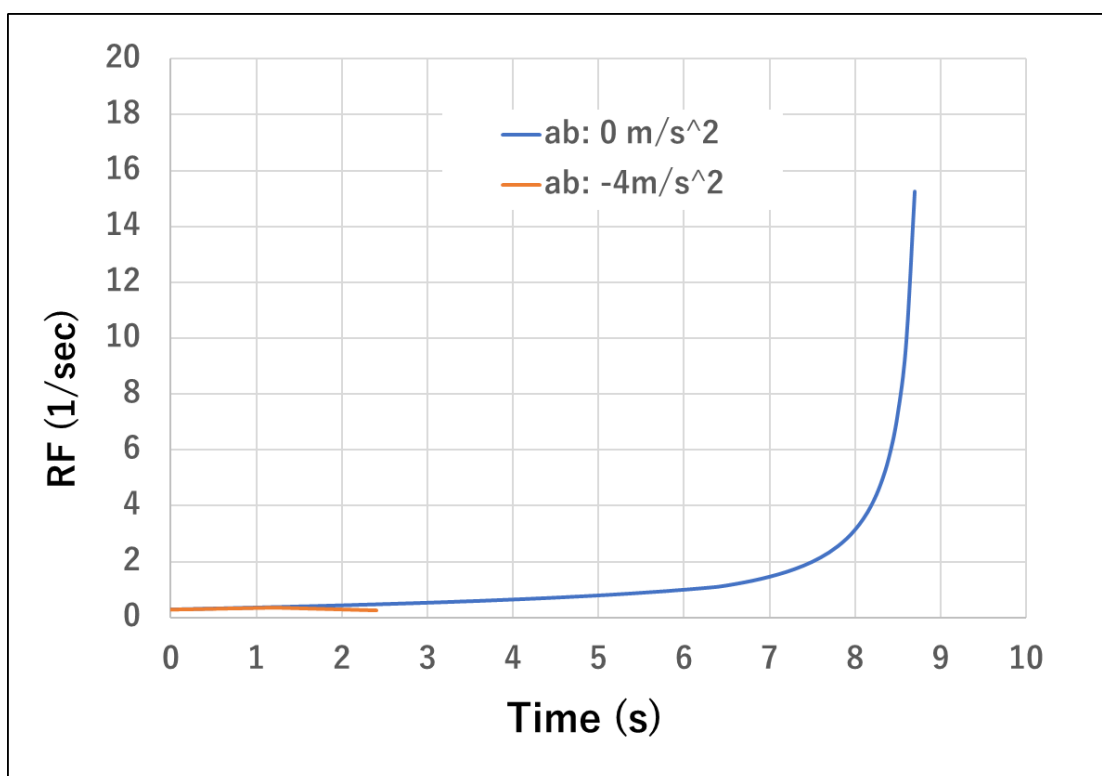


Fig. 43 RF of vehicle B Driver  $D_c:20\text{m}$ ,  $a_e:-2 \text{ m/s}^2$ ,  $a_b: 0, -4 \text{ m/s}^2$

次に、 $a_b$ を $-2 \text{ m/s}^2$ ,  $-4 \text{ m/s}^2$ とした場合の結果を Fig.44 に示す。 $a_b = -2 \text{ m/s}^2$ の結果は RF が高まることなく落ち着いている。後方から追い上げる形となる車両 B は前方の EV と同じ加速度で G 減速すれば、車両 B のドライバーが前方車両との初期の車間距離を設けて走行していたことから、衝突のリスクを感じることなく終了している。また、EV と同等以上の減速を車両 B が行う場合、車両 B のドライバーの RF はグラフの Tr 後に車両 B が減速を開始したときから降下する。

これより、車両 B のドライバーのリスク感を抑えるためのポイントは以下である。

- ・先行車の EV と同等以上に減速をすること。
- ・車両 B が上記のように減速を開始した時点でリスク感(RF)は下降を開始。

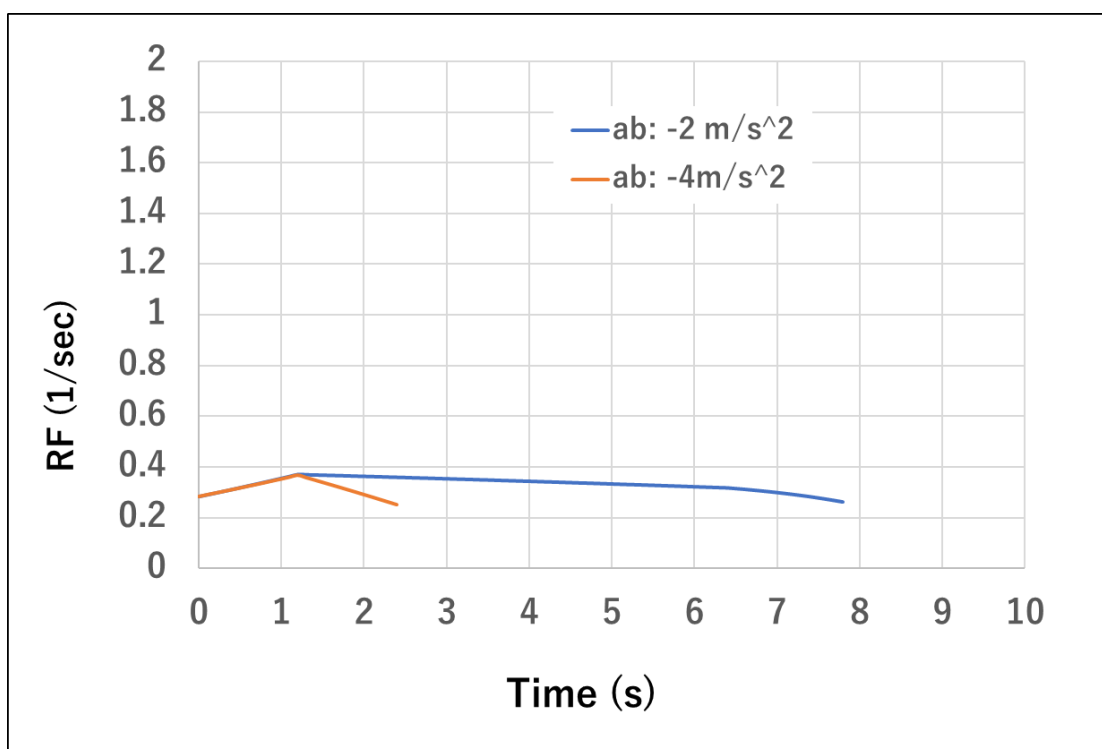


Fig. 44 RF of vehicle B Driver (Dc:20 m、 $a_e:-2 \text{ m/s}^2$   $a_b: -2 \text{ m/s}^2, -4 \text{ m/s}^2$ )

● EVの減速度が車両Bのドライバーのリスク感にもたらす影響

次に、 $D_c$ の違いが車両Bのドライバーのリスク感にもたらす影響を検討する。Fig.45は  $D_c=20\text{ m}, 40\text{ m}$  のそれぞれについて、EVの加速度は $-2\text{ m/s}^2$ とし、 $a_b$ を  $-2\text{ m/s}^2, -4\text{ m/s}^2$ とした計算結果である。この図から、EVが車両Aに対して設定する  $D_c$ の値は車両BのドライバーのRFに直接には影響せず、 $a_b$ の加速度が影響していることが分かる。また、時間が1.2 secを超えて車両Bのドライバーが減速を開始した時点でRFは下がる一方となる

ここで、車両BのドライバーがEVに対して設けている車間距離を120 mとした。

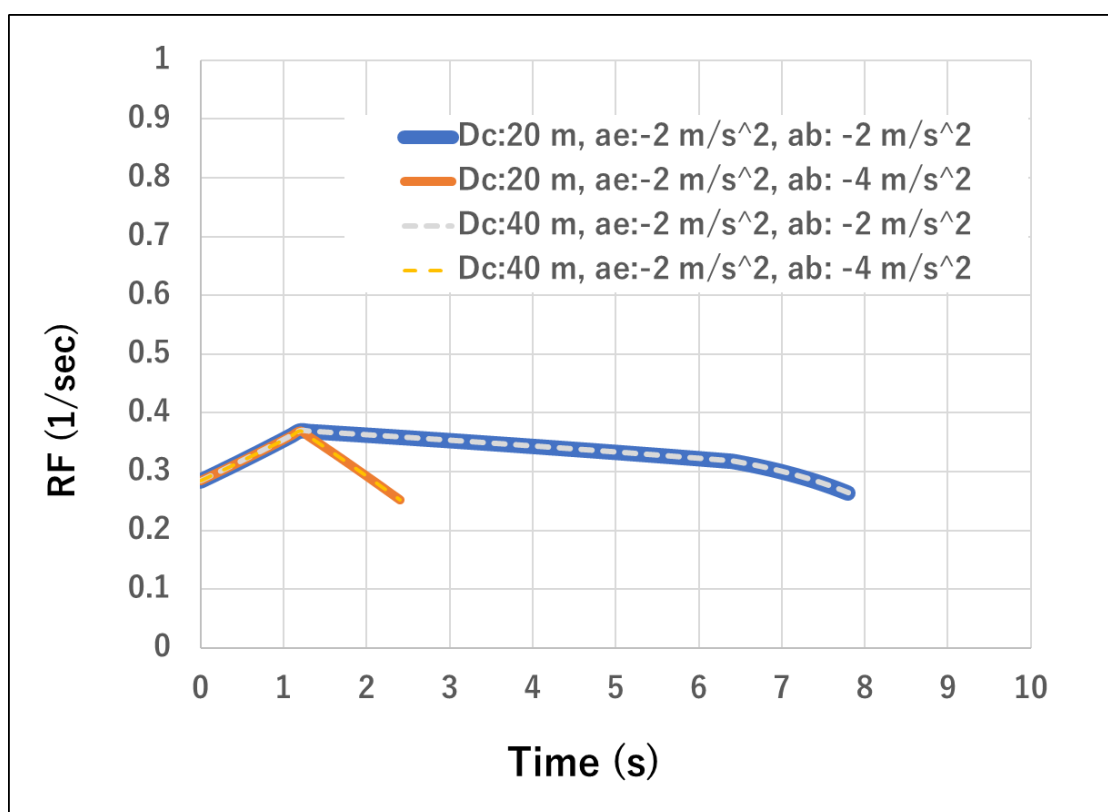


Fig. 45 RF of vehicle B Driver \_ ( $D_c:20\text{ m}, 40\text{ m}$ )

次に、Fig.46 は  $D_e = 40$  m の時の、EV の加速度と車両 B の加速度が車両 B のドライバーの RF へあたえる影響を示している。車両 B の加速度は  $a_b = -2$  m/s<sup>2</sup> とした。EV と車両 B の加速度がともに同じ値である場合には RF は高まることはないが、EV の減速度が  $-4$  m/s<sup>2</sup> に対して、車両 B の減速度が緩い場合には衝突の危険が生じ、車両 B のドライバーの RF は高まりを見せる。

車両 B のドライバーのリスク感を高めない(RF を高めない)ためには、先行する EV の減速度に対して、車両 B がそれ以上に急激な制動をしないことである。

STAGE 4 において以下であること。

$$a_e > a_b \quad (a_b < 0, a_e < 0)$$

車両 B のドライバーの RF は EV の減速度に応じて車両 B がそれと同等以上に急な減速を行うこと ( $a_e \geq a_b, a_e < 0, a_b < 0$ ) により抑制されることが Fig.46 に示された。EV が緩やかな減速度で RF を低く保てるように  $D_c$  を求めることが、EV のドライバーと車両 B のドライバーの RF を共に、急な減速を行うことなく、低く抑えることにつながる。

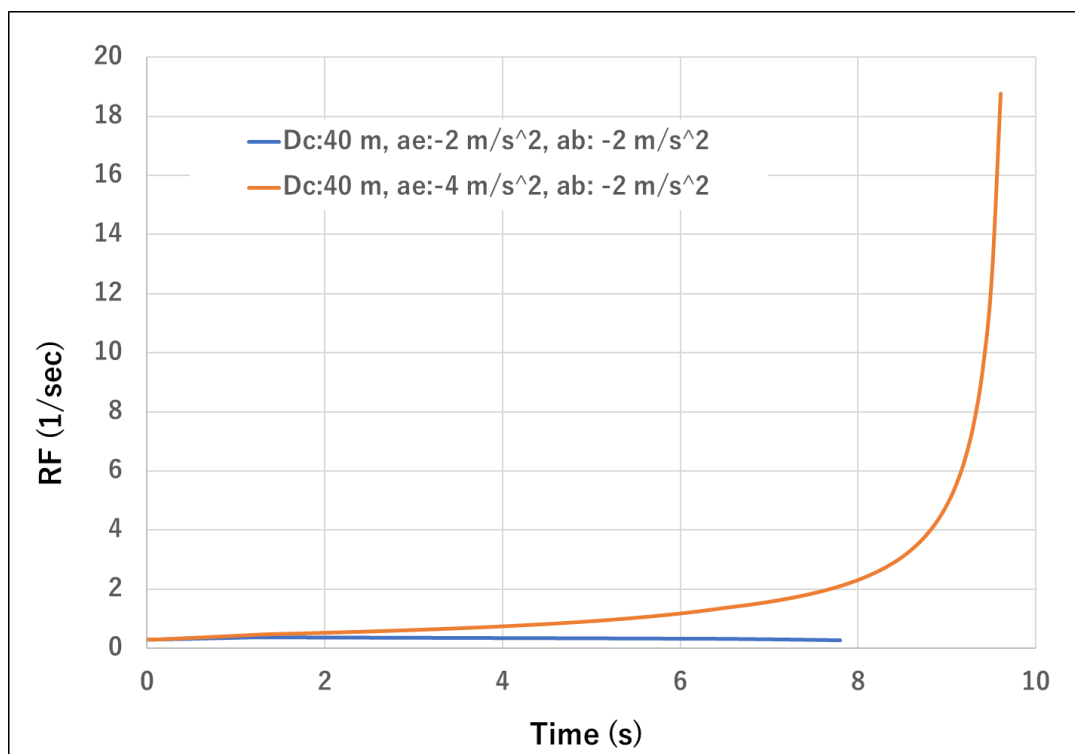


Fig. 46 EV と車両 B の加速度 (減速) の違いによる車両 B のドライバーの RF

### 4.3.3 車両 A の斜め後方 PRAV の算出式の導出

車両 A の後方の PRAV 設定値の算出について道程と共に示す。

#### STAGE 1 車両 A が車線変更する間

EV:  $v_{e0}$  で等速度走行、

車両 A: 車線変更中であり、車両の進行方向には速度  $v_a$  で走行し、  
車線の進行方向  $v_{va}$  で等速走行を行う。

車両 A の車線進行方向に対する角度を  $\theta$  としたとき、

$$v_{va} = v_a \times \cos \theta$$

STAGE1 が行われる時間（車両 A が車線変更にかかる時間）は以下となる。

$$T_{st1} = w \div v_{ha} = w \div (v_a \times \sin \theta)$$

$w$ : 車線幅 (m)

車両 A は速度  $v_{ha}$  で距離  $w$  を移動して車線変更を完了する。

上記時間が経過した STAGE1 終了時点における EV と車両 A の位置 (各、 $P_{e1}$ 、 $P_{a1}$ ) は以下となる。

$$P_{e1} = v_{e0} \times T_{st1} = v_{e0} \times w \div (v_a \times \sin \theta)$$

$$\begin{aligned} P_{a1} &= D_c + v_{va} \times w \div v_{ha} = D_c + v_a \times \cos \theta \times w \div v_a \times \sin \theta \\ &= D_c + w \times \cos \theta \div \sin \theta \end{aligned}$$

車両 A から EV までの距離は以下

$$\begin{aligned} D_{ae1} &= P_{a1} - P_{e1} = D_c + w \times \cos \theta \div \sin \theta - v_{e0} \times w \div (v_a \times \sin \theta) \\ &= D_c + w \div \sin \theta \times (\cos \theta - v_{e0} \div v_a \times 1 \div \sin \theta) \end{aligned}$$

#### STAGE 2 車両 A の前方への出現で EV が制動の準備を行う間（反応時間 $T_r$ ）

EV:  $v_{a0}$  で等速度走行 STAGE1 と変わらず。

車両 A:  $v_a$  で等速度走行 STAGE1 から速度が変化

STAGE2 終了時点 ( $t = T_{st1} + T_r$ ) の EV と車両 A の位置 ( $P_{e2}$ ,  $P_{a2}$ ) と距離 ( $D_{ae2}$ ) は STAGE1 に対して、STAGE2 での変化を反映して以下となる。

$$P_{e2} = P_{e1} + v_{e0} \times T_r$$

$$P_{a2} = P_{a1} + v_a \times T_r$$

$$D_{ae2} = P_{a2} - P_{e2} = D_c + v_{va} - v_{e0} \times w \div v_{ha} + (v_a - v_{e0}) \times T_r$$

### STAGE 3 EVが減速を開始する。

EV：加速度  $a_e$  で等加速度走行（減速）を行う。

車両 A： $v_a$  で等速度走行 STAGE2 と変わらず。

時間： $t_2 \leq T_r$

ここから時間の基準について「時間基準 2」を使用し、時間を「 $t_2$ 」として表現する。

車両 A の速度  $v_a$

EV の速度

$$v_e t_2 = v_{e0} + a_e \times t_2$$

EV と車両 A の相対速度

$$v_{rea} t_2 = v_e t_2 - v_a = a_e \times t_2 + (v_{e0} - v_a)$$

車両 A、EV が STAGE 3 で進む距離  $S_a(t_2)$ ,  $S_e(t_2)$  は以下

$$S_a t_2 = v_a \times t_2$$

$$S_e t_2 = v_{e0} \times t_2 + 1/2 \times a_e \times t_2^2$$

EV と車両 A の距離  $D_{ae}(t_2)$

$$\begin{aligned} D_{ae} t_2 &= S_a t_2 - S_e t_2 + D_{ae2} \\ &= v_a \times t_2 - v_{e0} \times t_2 - 1/2 \times a_e \times t_2^2 + D_{ae2} \\ &= -1/2 \times a_e \times t_2^2 + v_a - v_{e0} \times t_2 + D_{ae2} \end{aligned}$$

ここで EV は減速を行うため、 $a_e < 0$  とする。

上式は以下となる。

$$D_{ae} t_2 = 1/2 \times |a_e| \times t_2^2 + v_a - v_{e0} \times t_2 + D_{ae2}$$

この式の第 1、2、3 項をそれぞれ、 $a, b, c$  とし、また、 $F = b^2 - 4ac$  とすると、

$$F = (v_a - v_{e0})^2 - 2 \times |a_e| \times D_{ae2}$$

$t_2 = -(v_a - v_{e0}) \div |a_e|$  の時に、 $D_{ae}(t_2)$  は最小値  $D_{ae min}$  となる。

$$D_{ae min} = -F \div 4 \times 1/2 \times |a_e| = D_{ae2} - (v_a - v_{e0})^2 \div 2 \times |a_e|$$

$D_{ae min}$  は EV と車両 A の車間距離が最も近づいている値を算出するものである。

Fig.47 に  $D_{ae}$  と EV ドライバの RF 算出結果を示す。  
 この場合、RF に対しては  $1/T_{HW}$  が支配的であることが分かる。

$D_{ae\ min}$  における  $1/T_{HW}$  の値は式(3)の車間距離に  $D_{ae\ min}$  を代入して求める  $1/T_{HW}$  について、これを 1.5 以下になるよう、各パラメータ設定を行うことで EV ドライバのリスク感(RF)の高まりを抑制する設定が可能となる。  
 このケースにおける  $1/T_{HW} \leq 1.5$  は  $D_c = 40\ m$  ( $a_e = -2\ m/s^2$ )の結果より。

$$v_e = v_{e0} + a_e \times t_2$$

$$D_{ae\ min} = D_{ae2} - (v_a - v_{e0})^2 \div 2 \times |a_e|$$

$$1/T_{HW} = v_e \div D_{ae\ min} \leq 1.5$$

ここで

$$t_2 = -(v_a - v_{e0}) \div |a_e|$$

$$D_{ae2} = D_c + v_{va} - v_{e0} \times w \div v_{ha} + (v_a - v_{e0}) \times T_r$$

$a_e$  が急な減速を行わずに対応するため、 $a_e = -2\ m/s^2$  に設定する。  
 これにより後続の車両 B のドライバもまた同じ減速度で減速すれば良く、急減速をせずに車両 B の RF を低減することとなる。

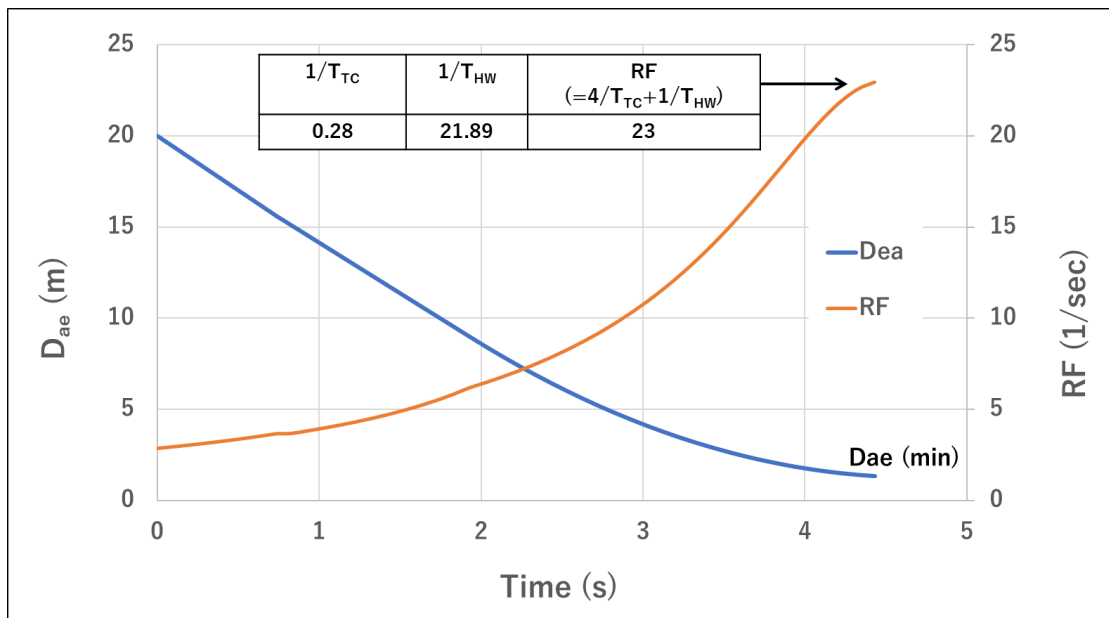


Fig. 47 車両 A から EV までの距離と EV ドライバの RF 算出結果  
 ( $D_c = 20\ m$ ,  $a_e = -2\ m/s^2$ )



## 4.4 車両 A 前方の PRAV 評価 (シナリオ 4)

車両 A の前で EV が減速停止型の MRM を実行する。車両 A と EV との車間距離 ( $D_f$ ) は車両 A によって決められる。車両 A が車間距離を十分に設けずに走行する場合、EV は 車両 A の前方を走らない選択肢をとり得る。

EV が減速停止型の MRM を行う場合、 $D_f$  の初期値がどの程度であれば車両 A のドライバがリスクを感じずに済むかを検討する。

fig.48

- (a) EV は車両 A の運転レベルの評価を終えて車両 A の前を走行中
- (b) EV : MRM のためのフォールバック制御を開始する。(4 m/s<sup>2</sup>で減速する)  
車両 A : EV のハザードランプを合図に制動の準備を開始する。
- (c) EV : MRM のフォールバック制御を継続する。  
車両 A : (b)から反応時間  $T_r$  (1.2sec) の後に制動を開始する。
- (d) EV : 減速を継続する。  
車両 A:減速を行う。
- (e) EV:停止する。

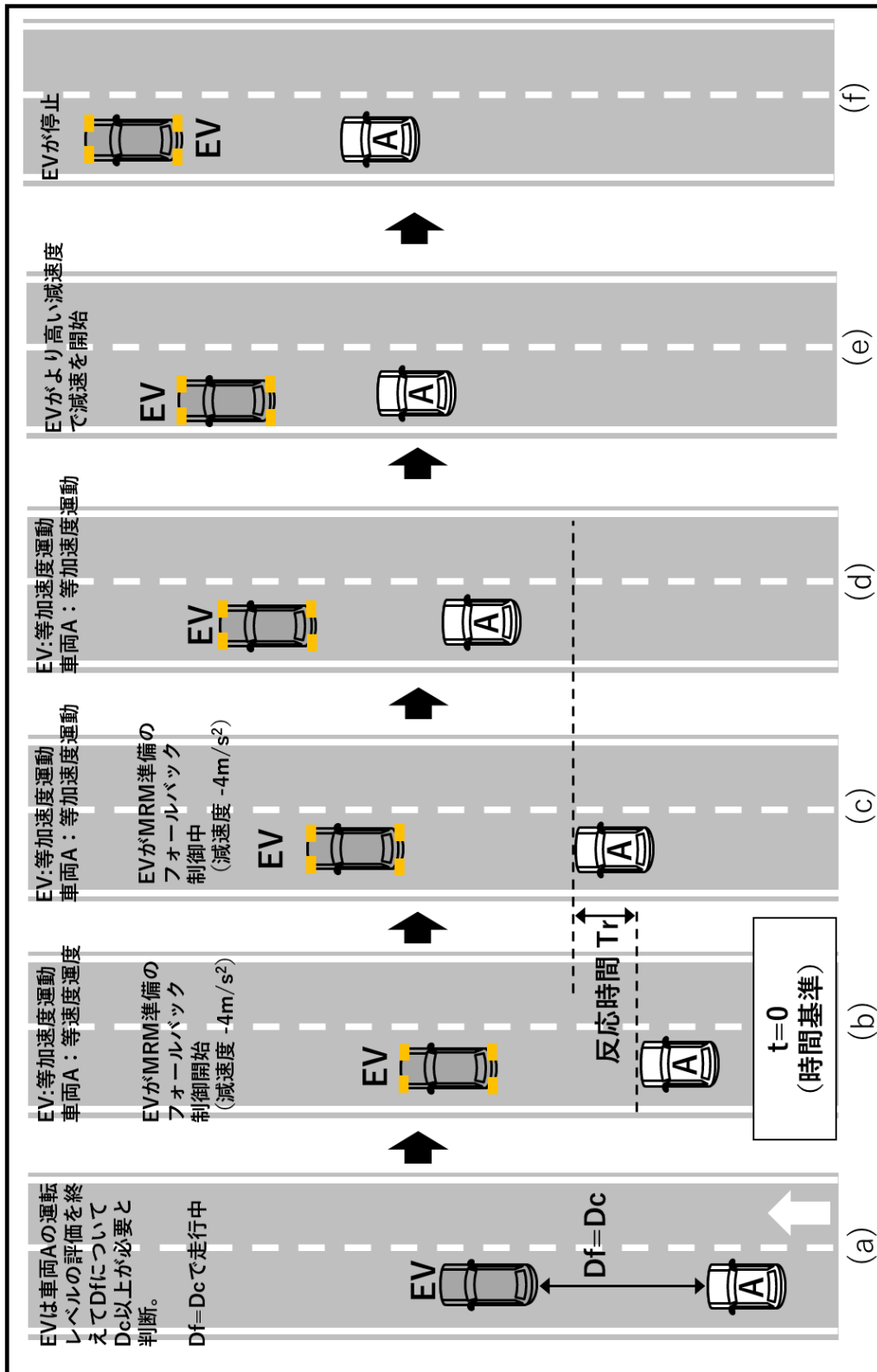


Fig. 48 車両 A 前方の PRAV 検討シナリオの図

#### 4.4.1 MRM を発動した EV の後続車のリスク低減

このシナリオでは車両 B は登場しない。交通環境の急変を及ぼすものが EV であり、その周辺車への影響として車両 A のドライバーが持つリスク感について検討する。

また、このシナリオは Fig.48 (e)以降に車両 A のドライバーが落ち着いて次の行動をとれることを目的とし Fig.48(d)までを対象として検討を行う。

#### 4.4.2 後続車のリスク感の緩和を考慮した車間距離の設定

EV と車両 A の動作からシナリオを STAGE1,2 に分ける。

##### **STAGE 1** $t \leq T_r$ (Fig.40 (b))

EV の MRM 準備段階のフォールバック制御が開始されてから、反応時間  $T_r$  の間。

EV :  $a_e = -4 \text{ m/s}^2$  で減速走行、車両 A : 等速度走行

フォールバック開始時から EV はハザードランプにより周囲へ異常発生を知らせるため、車両 A のドライバーはこれに気が付いて制動の準備を始めるが、アクセルペダルからブレーキペダルへの足の踏み替えなど、実際に車両が制動を開始するまでには反応時間  $T_r$  を要する。時間  $T_r$  において、車両 A は等速度走行を行う。

Fig.48(b)のシーンの時間を時間基準  $t=0$  とし、 $t=0$  の車両 A の車体先端位置を位置の基準とする。

EV の速度 (等加速度走行)

$$v_e t = v_{e0} + a_e \times t$$

車両 A の速度 (等速度走行)

$$v_a = v_{a0}$$

車両 A と EV の相対速度

$$v_{rae} t = v_{a0} - v_e(t)$$

$t$  (s)後の EV の位置は以下。

$$P_e t = D_{ea0} + v_{e0} \times t + 1/2 \times a_e \times t^2$$

$D_{ea0}$  は  $t = 0$  での車両 A (車体先端) から EV (車体後端) までの距離であり、すなわち、 $t = 0$  における EV の位置である。

また、EV の加速度については  $a_e = -4 \text{ m/s}^2$  (減速) とする。

国際連合欧州経済委員会による自動車基準調和世界フォーラム UNECE WP.29 [14]の提案において MRM における減速度を  $4 \text{ m/s}^2$  以下としている。 $a_e = -4 \text{ m/s}^2$  より強い制動を推奨しないということである。これに準拠した場合の最も EV が急激に減速する時の値とすることで、車両 A のドライバーのリスク感が上がりやすい不利な条件を考慮し

た。

$t$  (s)後の車両 A の位置は以下。

$$P_a t = v_{a0} \times t$$

$t$  (s)での EV と車両 A の距離

$$D_f t = P_e t - P_a(t)$$

車両 A と EV の相対速度

$$v_{rae} t = v_a t - v_e(t)$$

**STAGE 2**  $t > T_r$  (Fig.40 (c)(d))

EV の MRM 準備段階のフォールバック制御が開始されてから、反応時間  $T_r$  を過ぎた状態。

EV :  $a_e = -4 \text{ m/s}^2$  で減速走行継続、車両 A :  $a_a \text{ m/s}^2$  で等加速度走行

車両 A の  $a_a$  について、強い減速を行うことなく対処するため、 $a_a = -2 \text{ m/s}^2$  とする。

EV の速度  $v_e(t)$

STAGE1 と同じ式を使用

車両 A の速度

$$v_a t = v_{a0} + a_a \times (t - T_r)$$

車両 A と EV の相対速度  $v_{rae}(t)$

STAGE1 と同じ式を使用

$t$  (s)での EV と車両 A の距離  $D_f(t)$

STAGE1 と同じ式を使用

$v_{rae}(t)$ と  $D_f(t)$ と式(1), (2), (3)から求めた RF を Fig.49、Fig.50 に示す。  
 $v_{e0}$ ,  $v_{a0}$ ともに 100 km/h, (27.8 m/s) 、EV の速度がマイナスに転じる、つまり実際には  
 生じ得ない逆走になる前までをプロットしたものである。  
 $D_0$ を Fig.41 では 50 m、Fig.42 では 100 m とした。

Fig.49 より、 $D_{f0} = 50$  m とした場合、車両 A と EV の距離が 19m までに近づくこと  
 で、RF が 3.39 まで上昇する。このままの車両 A の減速度では車両 A のドライバーは衝  
 突のリスクを感じてより強い制動を行い、リスク感の上昇を抑える行動をとると考えら  
 れる。

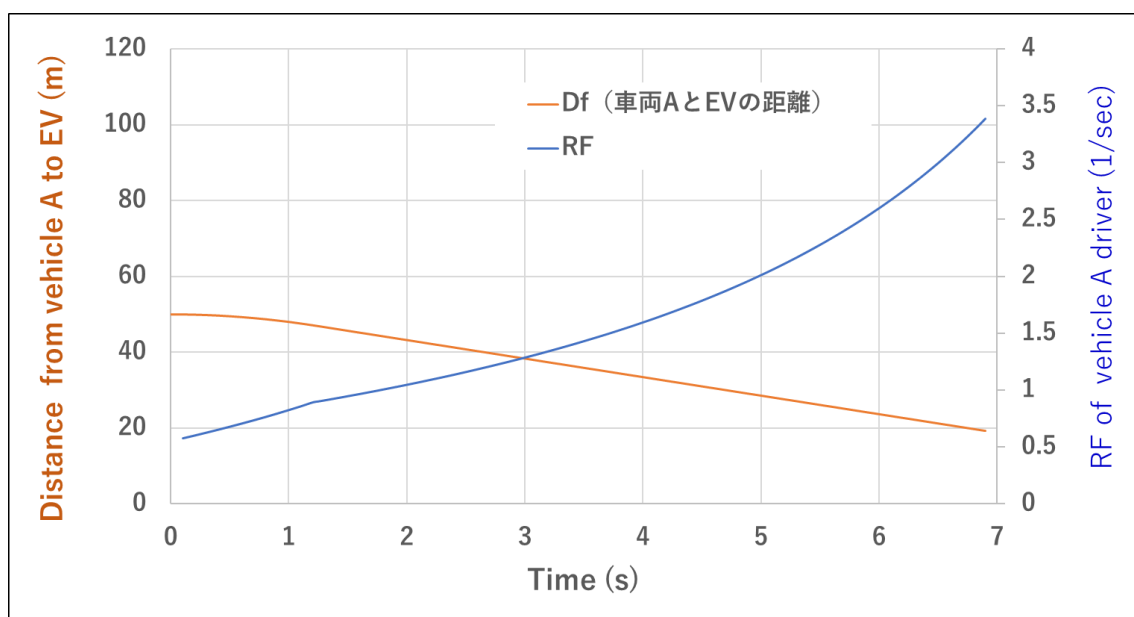


Fig. 49 車両 A のドライバーの RF  $D_{f0} = 50$  m

Fig.50 より、 $D_{f0} = 100 \text{ m}$ とした場合には、車両 A のドライバがもつリスク感を 1 未満に抑えることが出来る。この場合、ドライバはリスクを感じることなく、前方で生じた EV の MRM 動作に対処出来ると考えられる。

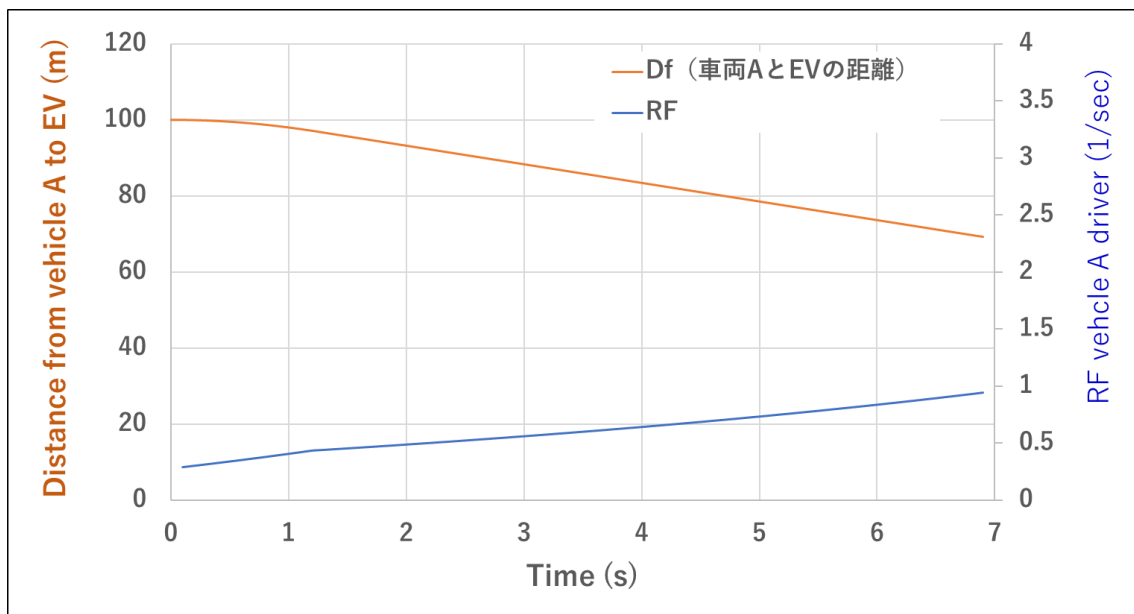


Fig. 50 車両 A のドライバの RF  $D_{f0} = 100 \text{ m}$

Fig.51 は、設定した  $D_c$  の値に対して、本シナリオで車両 A のドライバの RF が到達する値、すなわち、RF 最大値の関係をプロットしたものである。これを、EV がトリガイベントであるフォールバック制御を開始する前の巡航速度（車両 A、EV で同じ。 $v_{e0}=v_{a0}$ ）80 km/h、100 km/h について求めた。この図より、トリガイベント発生前巡航速度が 80 km/h であれば、 $D_c=80$  m、100 km/h であれば  $D_c=100$  m とすることで車両 A のドライバの RF を 1 以下となる。

これを車両 A の前方の PRAV 算出に利用する。

$$PRAV(Front) = v_{a0} \times 3600 \div 1000$$

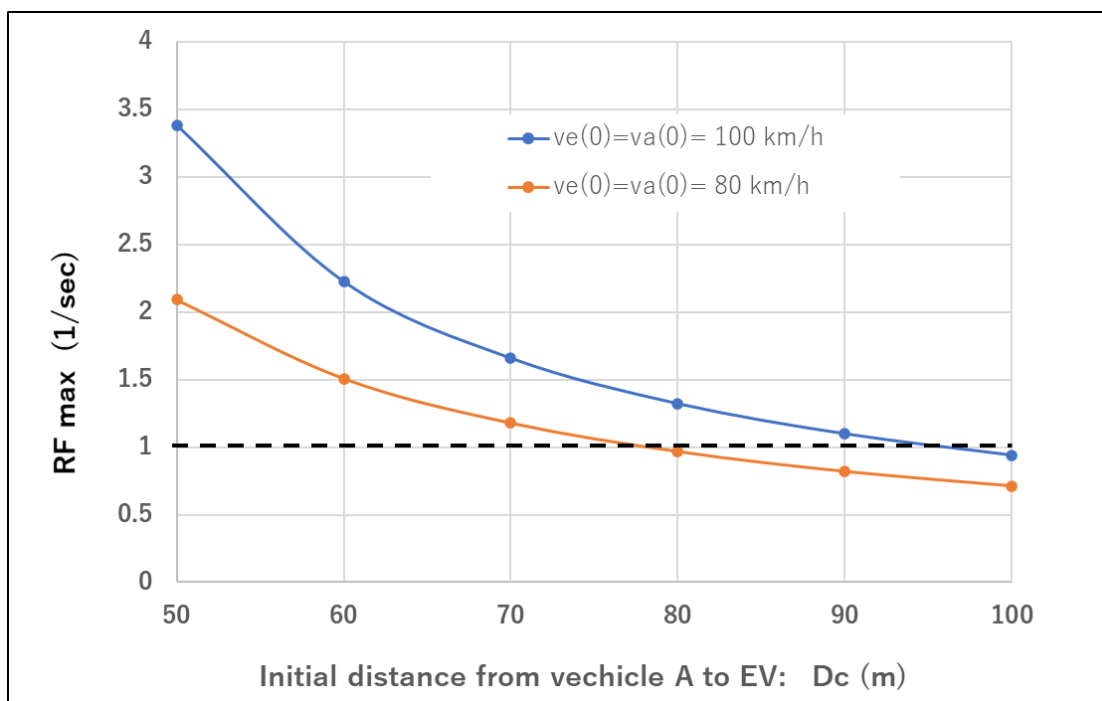


Fig. 51 設定した  $D_c$  と車両 A ドライバの RF (初速 80 km/h, 100 km/h)

## 4.5 FTA による本コンセプトの効果確認

FTA(Fault Tree Analysis)を用いて本コンセプトの効果を確認する。本コンセプトの目標はADVの社会受容性のため、同じ交通環境を走行する周辺車両のドライバーにADVの動きが不安を与えないことである。よって、FTAのトップ事象を「EVが危険回避する際、周辺車両にリスクを感じさせてしまう」として、シナリオ1についてFault Treeを展開した。本文中のシナリオ1は制動のみで回避することを前提としたが、FTAでは制動のみで回避出来ない場合も想定した。このため、周辺車両としてEVの走行車線の隣接車線を走行する車両の存在も想定している。

結果、第1として、操舵を伴う危険回避を行わないよう、EVがリスク回避出来れば良いとすることを避けるために、本コンセプトを適用することは効果があると考えられる。もしも、ADSの外界検知センサ（カメラ、レーダ、Lidarなど）、またはその処理回路で認識性能や処理の課題がある場合にも、本コンセプトを設定することで技術的にこれを解決、または、ADSを動作させるODDの設定で速度域を限定する等の幅広い対処方法の検討の余地を生むことができる。

第2は、第1と共通するが、EVの危険回避を優先したADSの設定を行わないことは、減速停止で危険を回避する際にも有効性があることを確認した。

第3として、制動装置の性能不足などはADSの動作が関わらない場面においても共通の問題であり、これ車両の設計での対処となり、本コンセプトは関連しない。また、後続車のドライバーのマナーの問題に対しても本コンセプトは有効性がない。



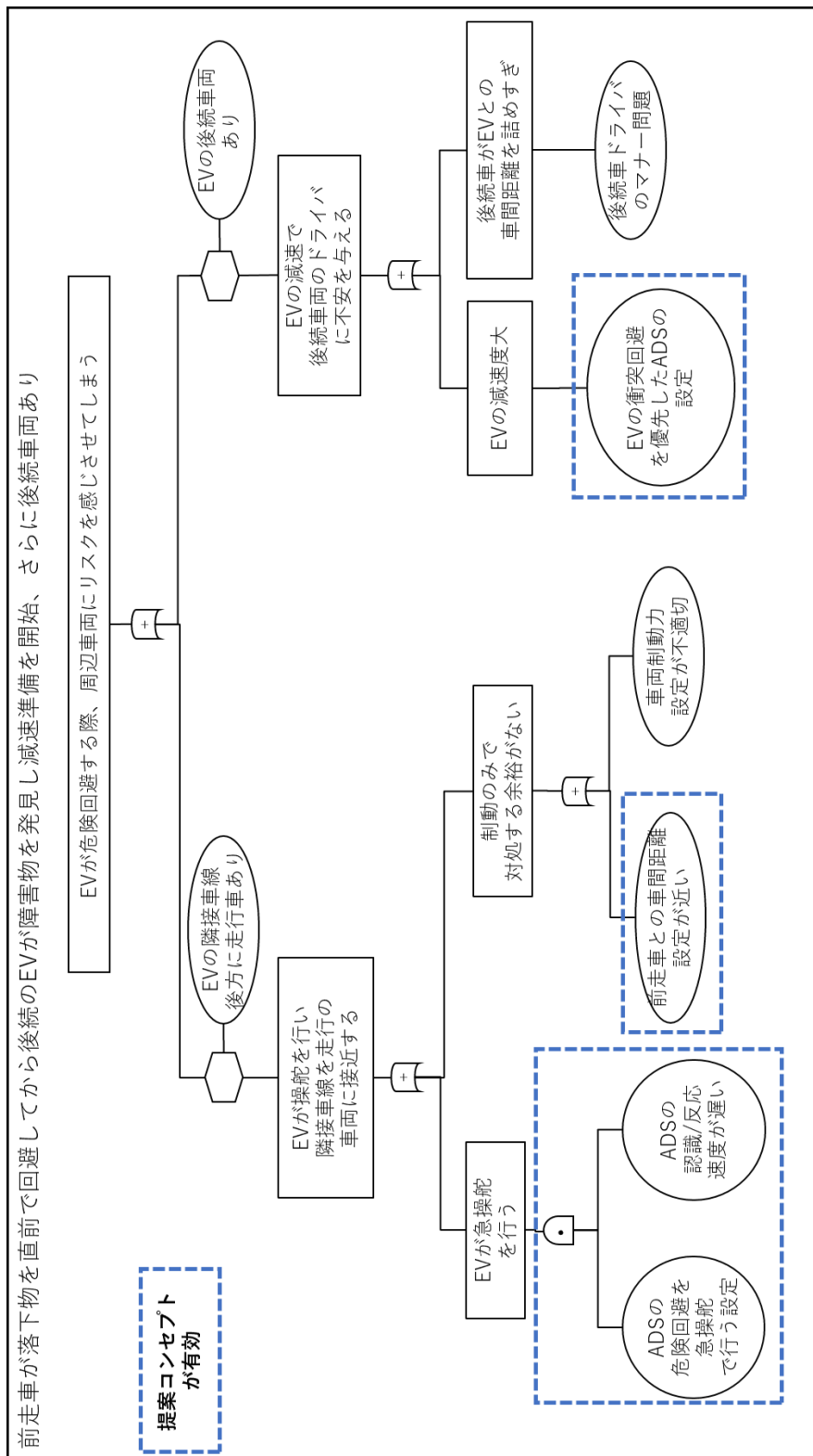


Fig. 52 FTA 本コンセプトの有効性確認

## 第5章 結論

本研究では、自動運転車が社会から受容されて普及し、期待に応えることを願い、他の交通参加者から受け入れられるよう、「周辺車両の運転評価に基づく、周辺車両へのリスクに配慮した危険回避を行うためのADSコンセプト」を提案した。これは、ドライバーが経験から学習して蓄積したことを元にリスクを予測し回避するものである。狙いは自車の危険回避によるリスクだけでなく、影響を受ける周辺車両のリスクを低く抑えることにある。リスクを予測、回避する方法は、まず、走行中に周辺車両の運転レベルを評価する。この評価はADSのPerception Systemを構成する外界認識用のカメラ、レーダ、Lidarなどのセンサ類で周辺車両の位置、動き、特徴を捉え、ADSで判断して行う。周辺監視の注意を怠る等の運転レベルの低い車両からある程度の距離を置く。このある程度の距離を置くなどが、万が一に運転レベルの低い車両によって交通環境の変化がもたらされたときに、EVが自車と周辺車両のリスクを抑えて危険を回避するための「事前準備」にあたる。本コンセプトではこの「事前準備」を行うことが重要であり、そのための「Potential Risk Area of the Vehicle (PRAV)」を同時に提案した。

本研究では、高速道路の直線路の走行を前提としたときのPRAVを求めた。対象の車両周辺のエリア毎のPRAVを評価するための4つのシナリオを設定した。最も各エリアのPRAV寸法を長く設定する必要があるシナリオを設定したものである。シナリオにはEVがMRMを作動させて危険源となる場合を含む。評価はEVのドライバー、影響を受ける周辺車両のドライバーが感じるリスクを低く抑えることについて行い、リスク感を示す指標として、関連研究で提案されたRisk Feelingを使用した。これは $4/TTC+1/THW$ から求められるものである。シナリオの中で、後続の周辺車が前走のEVの危険回避の影響を受ける場合、EVの減速度が周辺車両のドライバーのリスク感に影響し、EVが減速度を抑えるためには、EVが危険源の車両に対して予め設定するPRAVの長さが影響する相関関係が明らかになった。EVが自車のリスク低減を優先するなら、高い減速度（急な減速）を行うことも考えられるが、後続車両にとっては、前走車であるEVとの距離が急に縮められるために、RFが大きくなることに注意を要する。

PRAVの評価結果の例として、対象車の後方については、時速100 km/hで走行する場合、車両Aの後方を走行するEVのドライバーは一般的に100 mとされる車間距離よりもさらに35mを加算し、135mの距離を空けることが妥当であると考えられる。このようにPRAVの設定手法を確認し、PRAVの形状を得た。

次にFTA(Fault Tree Analysis)により、このコンセプトがどのように有効であるかを確認した。結果として、シナリオで設定した制動のみでの危険回避での有効性だけでなく、制動のみで危険回避する余裕のある設定を行うことを前提とするため、操舵を伴うことで生じるリスクを回避できることが分かった。

今回の研究では、高速道路の直進に限定して検討し、交通参加者が多種多様で、交差点、十字路、T字路など複雑な交通環境である一般道路での有効性は検討していない。一般道路では様々な属性の交通参加者がそれぞれ、異なる動き方をし、歩行者、自転車による信号無視などが日常的に行われる状況、かつ、場所による制限速度の違いなど、ルールが複雑なこともあり、「予測」や「事前準備の成立性」が難しくなると考えられる。

走行する車両同士はある程度の距離内に入るとお互いに危険源となり、1台の車両の不注意が周辺車両の事故発生要因になる、ドライバーは危険を感じる運転を行う車両を良くは思わないだろう。今後、市場に登場する自動運転車が、他の交通参加者から良い動きをして安心出来ると認められ、信頼を得て普及し社会から期待される役割を果たせることを願う。

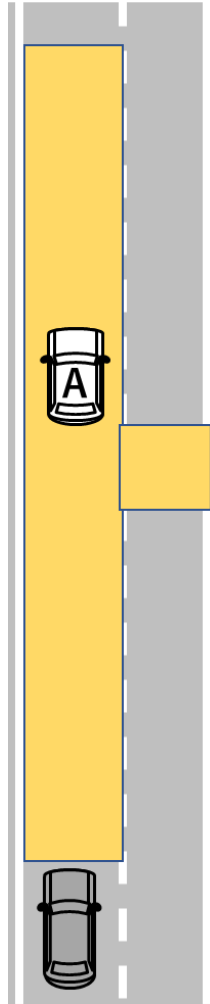


Fig. 53 PRAV (高速道路直進)

## 謝辞

本研究の実施と執筆にあたり、多くの方々から多大なご支援を頂きました。

慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科教授 西村秀和先生には、私が業務や勤務地との移動時間で修士論文研究にかけられる時間が限られていることなど、多くの事を気にかけて頂きながら、熱心にご指導頂きました。二十数年ぶりの修士論文研究で不慣れな私に根気強くお付き合い頂き、特に私が業務での問題に直面し、あまりにも現実的に考えすぎるが故に修士論文研究への取り組みに迷いが生じているときに、現実の問題はたくさんあるけれど、せっかくの論文研究なのだから夢を持って自由に考えれば良いとお話し頂き、大切なことに気づかせて頂きました。おかげで、私自身が進んで良かったと思える修士論文の研究ができました。心より感謝申し上げます。

副査を担当頂きました中野冠教授には率直なご意見を頂くと共に、自動車に関する楽しいお話もさせていただきながら貴重なアドバイスを頂きました。

西村研究室の皆さんにはゼミでの大変貴重なお話とご意見を頂いたことを心から感謝しております。

大学院の同級生の皆さんからも助け合い、親切にさせていただいたこと大変有難く思います。先輩の方々の研究やご助言からは多くの気づきを頂き参考とさせていただきます。皆様にお礼を申し上げます。

家族の父には常日頃からの協力に感謝します。

最後に真喜子と三島、御殿場のご親族の方々には感謝の言葉を申し上げずにいられません。これまでとこれからの私があるのは皆様のおかげです。皆様との日々をいつも私の心の支えとさせていただいてこの研究も最後まで取り組むことができました。心から感謝いたします。誠にありがとうございます。

## 参考文献

- [1] “スバル アイサイト搭載車の事故件数調査結果について,” 株式会社 SUBARU, 26 1 2016. [オンライン]. Available: [https://www.subaru.co.jp/press/news/2016\\_01\\_26\\_1794/](https://www.subaru.co.jp/press/news/2016_01_26_1794/).
- [2] 碓井茂夫、野村直樹、熊谷光、関根浩史, “運転支援システム "アイサイト" の事故低減への取り組み,” 日本AEM学会誌, 第1巻(全2巻)Vol.25, No.4, pp. 383-389, 2017.
- [3] “自動運転車の安全技術ガイドライン(平成30年9月),” 国土交通省.
- [4] “官民 ITS 構想・ロードマップ 2020,” 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民データ活用推進戦略会議.
- [5] 久米秀尚, “日経クロステック ベンツ、自動運転レベル3を21年後半から「Sクラス」刷新で,” 日経 BP, 10 9 2020. [オンライン]. Available: <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/04564/>.
- [6] 富岡恒憲, “日経クロステック 自動運転レベル3対応車、20年代初頭のダイムラー、21年のBMW,” 日経 BP, 13 5 2020. [オンライン]. Available: <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01288/00003/>.
- [7] “HONDA ニュースリリース 自動運転レベル3型式指定を国土交通省から取得,” 本田技研工業(株), 11 11 2020. [オンライン]. Available: <https://www.honda.co.jp/news/2020/4201111.html>.
- [8] 警察庁交通局, 令和2年中の交通事故死者数について, 2020.
- [9] “SUBARU 技術ミーティング 「SUBARUらしさ」を際立たせる技術 安心と愉しさ,” 株式会社 SUBARU, 22 1 2020年. [オンライン]. Available: <https://www.subaru.co.jp/subaruness/technology/>.
- [10] “Honda Sustainability Report 2020,” 本田技研工業株式会社, 2020.
- [11] 公益社団法人自動車技術会, “JASO テクニカルペーパー 自動車用運転自動化システムのレベル分類及び定義,” 2018.
- [12] SAE International, “SURFACE VEHICLE RECOMMENDED PRACTICE J3016TM SEP2016” .
- [13] NHTSA(National Highway Traffic Safety Administration), “A Framework for Automated Driving System Testable Cases and Scenarios,” September 2018.
- [14] United Nations, “Economic and Social Council (ECE/TRANS/WP.29/2020/81),” 2020.
- [15] SAE International, “SURFACE VEHICLE RECOMMENDED PRACTICE J3016TM JUN2018” .
- [16] 国土交通省自動車局 先進安全自動車推進検討会, “ドライバー異常時対応システム(減速停止型)基本設計書,” 平成28年3月.
- [17] 国土交通省自動車局 先進安全自動車推進検討会, “ドライバー異常時対応システム(路肩退避型)基本設計書,” 平成30年3月.
- [18] 総務省, “自動走行の実現に向けた総務省の取組,” 平成28年12月15日.
- [19] 株式会社 NTT ドコモ, “安全運転支援技術における”通信の可能性”, 著: 自動運転に対応した道路空間に関する検討会, 2019年8月28日.
- [20] 自動走行ビジネス検討会, “「自動走行の実現に向けた取り組み報告と方針」報告

概要 Version3.0,” 2019年6月26日.

- [21] D. Shin, B. Kim, J. Seo, K. Yi, “Effects of Wireless Communication on Integrated Risk Management based Automated Vehicle,” *IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation System*, pp. 1767-1772, 2015.
- [22] Q. Xu, K. Hedrick, R. Sengupta, J. V. Werf, “Effects of vehicle-vehicle/roadside-vehicle communication on adaptive cruise controlled highway systems,” *Vehicular Technology Conference, 2002. Proceedings. VTC 2002-Fall IEEE*, Vol.56, No.2, pp. 1249-1253, 2002.
- [23] ポンサントーン・ラクシンチャラーンサク, リスクポテンシャル予測による自動車の障害物回避運動制御, 第 巻 54, 2015, pp. 820-823.
- [24] 古賀あやめ, 奥田裕之, 田崎勇一, 鈴木達也, 原口健太郎, 康.子博, “運転個性を反映した予測型自動運転システム-評価関数手法の提案-,” *自動車技術学会論文集*, Vol.47, No.6, pp. 1431-1437, 2016.
- [25] 橋本康平, 石田裕太郎, 市瀬龍太郎, 我妻広明, 田向権, “論理知識型 AI に基づく自動運転のための危険予測システムの構築と提案,” *システム制御情報学会論文* Vol.31, No.5, pp. 191-201, 2018.
- [26] ソフトバンク株式会社, “ソフトバンクと SUBARU、自動運転のユースケースに関する実証実験を実施,” 24 11 2020. [オンライン]. Available: [https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2020/20201124\\_01/](https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2020/20201124_01/).
- [27] 加藤樹子, “日経 XTECH 「世界各地でセルラーV2X のフィールド実験」、クアルコムが最新状況を解説,” 14 1 2020. [オンライン]. Available: <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/news/18/06830/>.
- [28] 木下聡子, “自動運転車を取り巻く System of Systems アーキテクチャに対する安全の観点からの検証及び妥当性確認,” 慶應義塾大学大学院, 2018.
- [29] 本間亮平, 若杉貴志, 小高賢二, “自動運転車の Minimum Risk Maneuver の違いが後続車へ与える影響,” *自動車技術会論文集*, Vol.51, No.1, pp. 149-154, January 2020.
- [30] 岸川大航, 荒川幸代, “深層逆強化学習による自動運転の安心走行実現,” *The 33rd Annual Conference of the Japan Society for Artificial Intelligence*, pp. 1-4, 2019.
- [31] 松下寛治, 佐野周也, 大前学, “前方視野の危険感に基づくドライバモデルの自動運転制御への応用に関する研究,” *自動車技術学会論文集*, Vol.48, No.3, pp. 763-769, May 2017.
- [32] 米陀圭祐, 三田誠一, ヤン チェンシー, ドーコク フィ, テヘラニ ホイセン, 江川万寿三, 武藤健二, “自動運転システム用のレーンチェンジ経路計画,” *自動車技術会論文集*, Vol.47, No.1, pp. 165-170, January 2016.
- [33] 金子哲也, 杉山哲, 栗谷川幸代, 靱山富士男, 影山一郎, “車両周辺環境の変化に対応した危険感ポテンシャルと車両運動性能を考慮した自律走行のための制御目標生成,” *自動車技術会論文集*, Vol.44, No.2, March 2013.
- [34] 上坂竜規, 野田雅文, 日加田慶人, 出口大輔, 井出一郎, 村瀬洋, “ドライバの視線情報を利用した運転行動予測,” *信学技報*, pp. 1-6.
- [35] S. Martin, K. Yuen, M. M. Trivedi, “Dynamics of Driver's Gaze: Explorations in Behavior Modeling and Maneuver Prediction,” *IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT VEHICLES*, VOL.3, No.2, pp. 141-150, 2018.
- [36] N. Deo, A. Rngesh, M. M. Trivedi, “How Would Surround Vehicles Move ? A Unified Framework for Maneuver Classification and Motion Prediction,” *IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT VEHICLES*, VOL.3, No.2, pp. 129-140, 2018.

- [37] 平岡敏洋 , 高田翔太, “衝突回避減速度による衝突リスクの評価,” *計測自動制御学会論文集*, Vol.47, No.11, pp. 354-540, 2011.
- [38] 平岡敏洋, 増井惇也, 西川聖明 , 伊藤誠, “運転支援システムにおける提供情報の信頼性が運転行動に与える影響,” *自動車技術会論文集*, Vol.42, No.4, pp. 953-960, July 2011.
- [39] S. S. Shwartz, S. Shammah , A. Shashua, “On a Fomal Model of Safe and Scalable Self-driving Cars,” *Mobileye*, 2017.
- [40] ソニー株式会社, “情報処理装置、情報処理システム、および情報処理方法、並びにプログラム” . 日本国 特許番号: W02019/039212, 17 9 2020.
- [41] 伊佐治和美, 津留直彦, 和田隆広, 土居俊一 , 金子弘, *接近離間状態評価指標を用いたブレーキ開始タイミングの解析*, Vol.41, No.3, 2010, pp. 593-598.
- [42] 森田和元, 関根道昭 , 岡田竹雄, “運転支援システムのためのドライバのブレーキタイミングに関する要因の解析,” *計測自動制御学会論文集*, Vol.44, No.2, pp. 199-208, 2008.
- [43] 北島創, 久保登, 荒井紀博 , 片山硬, “映像記録型ドライブレコーダによる追突事故発生メカニズムの解析-衝突余裕度を用いたドライバ減速行動の解析とその応用の可能性-,” *自動車技術会論文集*, Vol.38, No.4, pp. 191-196, July 2007.
- [44] 宏. 青木, 浩. 安田 , 利. 福井, “前後方向の接近感に関する研究 -接近間指標 PRE の開発-,” *自動車技術会論文集*, 第 巻 Vol.42, 第 No.2, pp. 619-623, March 2011.
- [45] 和田隆広, 土居俊一, 津留直彦, 伊佐治和美 , 金子弘, “熟練ドライバの運転行動解析に基づく減速支援制御手法,” *デンソーテクニカルレビュー*, Vol.15, pp. 95-101, 2010.
- [46] L. N. David , “A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision,” *Perception*, volume 5, pp. 437-459, 1976.
- [47] 北島創, 丸茂喜高, 平岡敏洋 , 伊藤誠, “リスク認知に関する評価指標の比較検討,” *自動車技術学会論文集*, Vol.40, No.2, pp. 597-602, March 2009.
- [48] 近藤崇之, 山村智弘, 北崎智之, “先行車接近時におけるリスク感の定量化に関する研究,” *学術講演前刷り集*, No.99-05, pp. 23-26, 2005.
- [49] Takayuki KONDHO, Tomohiro YAMAMURA , Satoshi KITAZAKI, Nobuyuki KUGE , Erwin Roeland BOER, “Identification of Visual Cues and Quantification of Drivers' Perception of Proximity Risk to the Lead Vehicle in Car-Following Situations,” *Jarnal of Mechanicl Sytems for Transportation and Logistics*, Vol. 1, No. 2, pp. 170-180, 2008.
- [50] Continental Automotive GmbH, “HAVEit Deliverable D61.1 Final Report Version 1.0,” 2011.
- [51] 楠正篤 , 西村秀和, “Concept definition of an automated driving system by characterizing the solution space: the need for perception,” *慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科*, 2017.
- [52] 三浦遙夏 , 西村秀和, “走行可能エリアを決定する知覚システムを有する,” *慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科*, 2018.
- [53] 井上秀和, 巖佳二郎, “自動運転の実用化に向けた取り組みと将来展望,” *安全工学*, Vol.54, No.3, pp. 163-168, 2015.
- [54] 安藤敏之, “日産の自動運転実現に向けた取り組みと展望,” *計測と制御*, 第 54 巻 第 11 号, pp. 832-835, 2015 年 11 月号.

- [55] Christopher.D.Wickens, *Engineering Psychology and Human Performance*(1984) 4th Ed.2012, 2012.
- [56] 長山泰久, “JAF 危険予知の重要性 (危険予知・事故回避トレーニング),” [オンライン]. Available: <https://jaf.or.jp/common/safety-drive/online-training/risk-prediction/training>.
- [57] 国土交通省, “世界初! 自動運転車(レベル3)の型式指定を行いました,” 11 11 2020. [オンライン]. Available: [https://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha08\\_hh\\_003888.html](https://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha08_hh_003888.html).
- [58] Donghoon Shin, Kangmun Park, Manbok Park, “Effects of Vehicular Communication on Risk Assessment in Automated Driving Vehicles,” *Applied Science*, 2018.
- [59] 西村秀和, 白坂成功, 北村憲康, 木下聡子, ユン ソンギル, “システムモデルと繰り返し型モデル検査による次世代自動運転車を取り巻く System of Systems のアーキテクチャ設計,” 独立行政法人情報処理推進機構, 2014.
- [60] 平岡敏洋, 武内秀平, 増井惇也, 熊本博光, 泉達也, 畑中健一, “夜間時視覚支援システムにおける支援情報の差異が運転行動に与える影響,” *自動車技術会論文集*, Vol.41, No.2, pp. 495-500, March 2010.