

早稲田大学審査学位論文  
博士（人間科学）

先行車追従・接近場面における  
運転者の知覚-行為システムに基づく  
個人適応型リスク式の開発

Development of  
Individually Tailored Risk Feeling Formula  
Based on Drivers' Perception-Action System  
in Car-following Situations

2019年7月

早稲田大学大学院 人間科学研究科

近藤 崇之

KONDOH, Takayuki



## 論文要旨

交通事故の 9 割はヒューマンエラーによるものとの報告があり、ヒューマンエラーを減らすために自動運転 (AD, Autonomous Driving; Automated Driving) や運転支援システム (ADAS, Advanced Driver Assistance System) の開発・普及が加速している。AD や ADAS 導入時にさらなるヒューマンファクター課題を生じさせないためには、運転者の感覚に合致した AD や ADAS の開発が必要である。そのためには、運転者の知覚特性や運転特性を精査した上で、それらを考慮した制御を実現するモデル、すなわち“リスク式”が必要になる。

本論文では、運転行動の起点となる運転者の知覚特性を調べ、その知覚特性に基づくリスク式を構築した。次にリスク式と運転行動の関係について調べ、知覚特性に基づくリスク式によって基本的な運転行動を表現できること、その一方で、運転行動には個人間差があることを示した。リスク式をこの個人間差に対応させるため、個人の運転特性を反映させた個人適応型リスク式を構築し、さらにドライビングシミュレータ (DS) で取得した運転行動データ、および、ナチュラルスティックな運転行動データベース (NDD, Naturalistic Driving Database) を使った検証を行い、その有効性を示した。以下、章ごとの概要を記す。

第 1 章では、本論文に関わる背景と目的を述べた。

第 2 章では、運転に関わる知覚特性や運転行動特性を理解するにあたり、先行研究で得られている知見を確認した上で、本研究の課題を設定した。本研究では、先行車追従・接近場面におけるリスク式の構築にむけて、先行車追従・接近場面における運転制御のメカニズムを明らかにし、オプティカルフローに関係する 2 つの指標  $1/THW$  (車間時間 (Time Headway) の逆数) と  $1/TTC$  (衝突余裕時間 (Time-to-Contact) の逆数) に着目した。

第 3 章では、先行車追従・接近場面において、上記の 2 つの指標、 $1/THW$  と  $1/TTC$  に関して、人間の知覚特性 (知覚特性の定式化と閾値) を DS 実験から明らかにした。結果、運転者が見積もる接近知覚量は、 $1/THW$  と  $1/TTC$  に対してそれぞれリニアな特性を持つことがわかった。さらに、先行車の接近知覚の閾値は  $1/TTC$  に依存し、個人間差は大きくないことがわかった。この 2 つの指標を用いて、先行車追従・接近場面の運転者の主観的なリス

ク感を表現するリスク式  $RF$  ( $1/THW$  と  $1/TTC$  の線形和) を構築した。

第 4 章は、運転行動は運転者の内在的なリスク感が表出したものと仮定し、知覚特性に基づくリスク式やリスク式を構成する 2 つの指標と、運転行動の関係を確認した。DS 実験や公道実車実験から、リスク式とブレーキ操作特性の関係や、運転行動の時間分布を調べた。この結果から、運転行動の観点から 2 つの指標は独立した役割を持ち、リスク式に不可欠であること、ブレーキオンの限界特性はリスク式で表現可能であることがわかった。さらに第 3 章で検討した知覚特性には大きな個人間差はみられなかったが、ここで検討した運転行動には個人間差がみられた。したがって、リスク式においては個人間差を考慮すべきことが示唆された。

第 5 章は、アフォーダンス研究を参考にして、個人の運転行動特性を反映させた個人適応型リスク式  $RF_{ind}$  を提案した。リスク式は運転者の主観的なリスク感をあらわす尺度であることから、リスク感の異なると考えられるアクセルオフとブレーキオンの分別性能で妥当性の確認を行った。第 3 章で構築した従来のリスク式  $RF$  と比べて、 $RF_{ind}$  は先行車接近時におけるアクセルオフとブレーキオンがうまく分離できることを、DS 実験により明らかにした。

第 6 章は、より多くの実験参加者、かつ、リアルワールドにおける個人適応型リスク式  $RF_{ind}$  の実用性を評価するため、NDD を用いて、第 5 章と同様にアクセルオフとブレーキオンの分離性能を確認した。その結果、 $RF_{ind}$  は、従来のリスク式  $RF$  に比べて、アクセルオフとブレーキオンの分離性能が向上したことが示された。また、NDD を用いることにより、実験参加者のブレーキ操作特性や個人間差が明らかになった。

第 7 章は、総括的議論を行い、第 2 章から第 6 章までを通した結果の要約と展望を示した。また、今後の課題を併せて記載した。

最後に、第 8 章において、本論文の結論を述べた。

## SUMMERY

Traffic accident is a global social issue. It has been reported that 90% of traffic accidents involve human error. Therefore, to reduce the number of traffic accidents which are created by human error, autonomous driving (AD), or automated driving and/or advanced driving assistance systems (ADASs) have seen accelerated development and deployment. To avoid creating new human-factors difficulties when future AD and/or ADAS are introduced, it is important to match AD and ADAS designs with drivers' expectations. Additionally, a risk formula is needed, to enable vehicles to execute human like control. This risk formula for the vehicle should be based on understanding of drivers' perception capabilities and driving behaviors.

This dissertation presents such an investigation, considering drivers' perception as a primary factor in defining driving behavior, and developing a risk formula from what was learned related to perception. This work studied the relationship between the risk feeling (RF) and driving behavior, with driving behavior being expressed by the RF which was based on the perception and individual differences in driving behavior. Individually tailored RF formulas ( $RF_{ind}$ ) were developed which adapt RF to the individual driver's risk feeling. The utility was demonstrated using driving simulator (DS) experiments and through analysis of a naturalistic driving database (NDD).

The pivotal contribution of this dissertation is to establish a methodology that explains the experimental results at the individual driver level as well as within different driving conditions. This work provides the development of the  $RF_{ind}$ .

The organization of the chapters in this dissertation is as follows:

Chapter 1 describes the background and the purpose of this study.

Chapter 2 describes development of the risk feeling formula in car-following situations, organizing knowledge from past studies, understanding perception and behavior in driving and investigating the mechanism of driving in car-following situations. The study described in Chapter 2 was focused on two indices relating to optical flow ( $1/THW$ : inverse of time headway,  $1/TTC$ : inverse of time-to-collision). Based on investigation of past studies, general research questions and a research framework are established.

In Chapter 3, human perception (formulation between actual stimulus and magnitude of perceived stimulus; difference threshold) for both indices  $1/THW$  and  $1/TTC$  in car following situations was revealed through the use of driving simulator experiments. It was found that  $1/THW$  and  $1/TTC$  have

linear characteristic for the magnitude of drivers' subjective estimation, respectively. The difference threshold when lead car started to decelerate depended on  $1/TTC$  and there were not large differences between drivers. Moreover, using these two indices, the risk feeling formula (RF, linear combination of  $1/THW$  and  $1/TTC$ ), which expressed drivers' subjective feeling of risk in car-following situations, is proposed.

In Chapter 4, the relationship between RF was explored using DS and field testing. Hypothesizing that driving behavior could be considered as related to the intrinsic risk feeling, the relationship between the value of RF, the two indices in its formula, and driving behavior was investigated. Concretely, the relationship between RF and brake behavior, and time distribution for two indices in driving were analyzed. The results indicate that  $1/THW$  and  $1/TTC$  played a role in expressing a driving characteristic, were essential indices for RF, and the RF was associated with brake presses. Furthermore, large individual differences in the characteristic of perception were not found, however, individual differences in brake behavior were found. Based on this, it was determined that RF needed to account for individual differences in this area.

In Chapter 5, an individually tailored risk feeling formula ( $RF_{ind}$ ) was developed which considers individual driving behavior. The risk feeling formula is basically a scale of drivers' subjective risk, including the observed temporal separation between gas-off and brake-on, which provided a different measurement of risk. As compared with the RF described in Chapter 3, it was found that this  $RF_{ind}$  could differentiate between gas-off and brake-on in car-following situations using a DS experiment. The individually risk feeling formula also has utility in considering or modeling the actor's (driver's) choice within the available environment.

In Chapter 6, evaluation of the utility for  $RF_{ind}$  was performed using various participants in real-world driving, with same method to Chapter 5 (performance of separation between gas-off and brake-on) by using NDD. The result showed that  $RF_{ind}$  was improved by considering the temporal separation between gas-off and brake-on. Furthermore, NDD revealed individual differences in braking in real world conditions.

In Chapter 7, the work is discussed generally, along with a summary of findings from Chapter 3 through Chapter 6. Chapter 8 provides the conclusion of this dissertation.

# 目 次

論文要旨 .....	i
SUMMARY .....	iii
目 次 .....	v
図目次 .....	ix
表目次 .....	xii
1 序章 .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 本論文の目的 .....	2
2 運転行動における知覚と行為に関する知見 .....	3
2.1 概要 .....	3
2.2 運転行動のメカニズム .....	3
2.3 先行車追従・接近場面における指標 .....	8
2.3.1 先行車追従・接近場面の視覚情報 .....	8
2.3.2 グローバルオプティカルフロー .....	9
2.3.3 ローカルオプティカルフロー .....	10
2.3.4 その他の指標 .....	14
2.3.5 1/TTC-THW 位相平面における先行車追従・接近場面 .....	16
2.4 個人内差 .....	19
2.5 個人間差 .....	19
2.6 知覚-行為システム .....	20
2.7 運転行動理解に用いるツール .....	22
2.8 論理的な構成 .....	26
3 先行車追従・接近場面における知覚特性とリスク式構築 .....	28
3.1 緒言 .....	28
3.2 先行車追従場面における知覚特性 .....	29
3.2.1 概要 .....	29

3.2.2	固定式ドライビングシミュレータ .....	29
3.2.3	マグニチュード推定法 .....	31
3.2.4	実験手順 .....	32
3.2.5	実験結果および考察 .....	37
3.2.6	まとめ .....	38
3.3	先行車接近場面における先行車知覚特性 1: 閾値 .....	39
3.3.1	概要 .....	39
3.3.2	動揺式ドライビングシミュレータ .....	39
3.3.3	実験方法 .....	40
3.3.4	分析方法 .....	40
3.3.5	実験結果および考察 .....	43
3.3.6	まとめ .....	45
3.4	先行車接近場面における先行車知覚特性 2: 接近知覚量の定量化 .....	46
3.4.1	概要 .....	46
3.4.2	簡易型ドライビングシミュレータ .....	46
3.4.3	実験方法 .....	48
3.4.4	解析方法 .....	49
3.4.5	実験結果 .....	49
3.4.6	考察 .....	53
3.4.7	まとめ .....	55
3.5	1/THW と 1/TTC を統合したリスク感 .....	55
3.5.1	概要 .....	55
3.5.2	実験方法, および, 実験手順 .....	55
3.5.3	実験結果 .....	56
3.5.4	まとめ .....	57
3.6	リスク式の考え方 .....	58
3.7	リスク式の構築 .....	58
3.8	結言 .....	59
4	先行車追従・接近場面におけるリスク式と運転行動特性 .....	60
4.1	緒言 .....	60
4.2	ドライビングシミュレータにおける運転者のブレーキ行動特性 .....	61
4.2.1	概要 .....	61



4.2.2	実験方法 .....	61
4.2.3	実験結果と考察 .....	62
4.2.4	まとめ .....	65
4.3	公道走行実験データにおけるブレーキ操作特性 .....	66
4.3.1	概要 .....	66
4.3.2	実験方法 .....	66
4.3.3	実験結果と考察 .....	67
4.3.4	まとめ .....	68
4.4	公道走行データを用いたリスク値と走行実験割合 .....	69
4.4.1	概要 .....	69
4.4.2	実験方法 .....	69
4.4.3	実験結果と考察 .....	72
4.4.4	まとめ .....	79
4.5	結言 .....	79
5	個人適応型リスク式の提案とその妥当性検証 .....	80
5.1	緒言 .....	80
5.2	運転行動特性の違いを説明するアプローチ .....	80
5.3	個人適応型リスク式の提案 .....	81
5.4	個人適応型リスク式の妥当性の検証 .....	82
5.4.1	検証手順 .....	82
5.4.2	実験装置および実験方法 .....	84
5.4.3	分析方法 .....	86
5.5	実験結果 .....	86
5.6	考察 .....	100
5.7	結言 .....	101
6	個人適応型リスク式の実走行環境への適用 .....	102
6.1	緒言 .....	102
6.2	概要 .....	102
6.3	ナチュラルスティックな運転行動データ .....	102
6.4	データベースの分析対象 .....	103
6.5	先行車追従場面の抽出 .....	104

6.6	結果.....	105
6.7	考察.....	114
6.8	結言.....	115
7	統括的議論.....	116
7.1	本論文の概要.....	116
7.2	先行車追従・接近場面における知覚特性とリスク式構築（第3章）について.....	116
7.3	先行車追従・接近場面における運転行動特性とリスク式の妥当性（第4章）について 117	117
7.4	個人適応型リスク式の提案とその妥当性（第5章）について.....	117
7.5	個人適応型リスク式の実走行環境への適用（第6章）について.....	118
7.6	リスク式の構造について.....	118
7.7	アフォーダンス研究（ $\Pi$ 値）における新たな展開.....	119
7.8	NDSの活用とその意義.....	120
7.9	個人内差，特に運転状態について.....	121
7.10	本研究の人間科学に対する貢献.....	121
8	結論.....	124
	謝辞/ACKNOWLEDGEMENTS.....	125
	著者論文目録.....	127
	付録.....	128
	参考文献.....	130

## 図目次

図 2-1	Field of Safe Travel	4
図 2-2	車両-運転者-道路システムを一般化したブロック図 (Rockwell(1972)を元に作図)	5
図 2-3	タスクデマンドと運転資源の領域モデル (Fuller, 2005)を元に作図	6
図 2-4	追従運転行動に影響を及ぼす要因 (Ranney (1999)を元に作図)	7
図 2-5	先行車追従・接近場面の概念図	8
図 2-6	1/TTC, TTC が用いられた様々な研究	11
図 2-7	初期車間距離 60m から接近した場合の 1/TTC のふるまい	12
図 2-8	初期車間距離 20, 30, 40 60 m から接近した場合の 1/TTC のふるまい	13
図 2-9	典型的な追従場面とペダル操作	18
図 2-10	1/TTC-THW 位相平面上における追従運転のふるまい	18
図 2-11	論文の構成	27
図 3-1	追従・接近場面の分類	28
図 3-2	固定式ドライビングシミュレータ	30
図 3-3	実験風景	30
図 3-4	刺激強度と知覚された感覚量の関係 (参考文献(松田, 1995)から作図)	31
図 3-5	マグニチュード推定法の実験手順	33
図 3-6	車間距離を変化させた場合の 1/THW による先行車の接近度合の違い	35
図 3-7	1/THW の主観評価と客観的評価の関係	38
図 3-8	動揺式ドライビングシミュレータ	39
図 3-9	実験参加者ごとの単純反応時間	42
図 3-10	先行車の接近を知覚したタイミングの推定方法の概念図	42
図 3-11	先行車接近を知覚後のブレーキ操作時の 1/TTC と初期車間距離の関係 (実験参加者ごとの平均値)	44
図 3-12	先行車接近時の知覚時間を推定した 1/TTC と初期車間距離の関係 (実験参加者ごとの平均値)	44
図 3-13	先行車接近時の知覚時間を推定した 1/TTC と初期車間距離の関係 (実験参加者の平均値)	45
図 3-14	簡易型ドライビングシミュレータの概念図	47
図 3-15	接近度合実験用シミュレータの前方画面	47
図 3-16	主観的な接近評価値と接近条件の比率で定義した刺激強度の関係	52
図 3-17	主観的な接近評価値と接近の 1/TTC で定義した刺激強度の関係	52

図 3-18	実験で用いた評価実験の群	56
図 3-19	1/TTC-THW 位相平面における主観的なリスク感	57
図 3-20	1/TTC-THW 位相平面における主観的なリスク感とフィッティングしたリスク式	59
図 4-1	先行車接近時のブレーキ操作タイミング（初期車間ごと，実験参加者別）	64
図 4-2	先行車接近時のブレーキ判断タイミング（初期車間ごと，実験参加者別）	64
図 4-3	先行車接近時のブレーキ判断タイミング（初期車間ごと，実験参加者平均）	65
図 4-4	実験コース	67
図 4-5	1/TTC-1/THW 位相平面上におけるブレーキ操作タイミングとリスク式	68
図 4-6	実験車	70
図 4-7	1/TTC-1/THW 位相平面における同一追従時間割合とペダル操作：Participant A	74
図 4-8	1/TTC-1/THW 位相平面における同一追従時間割合とペダル操作：Participant B	74
図 4-9	1/TTC-1/THW 位相平面における同一追従時間割合とペダル操作：Participant C	75
図 4-10	1/TTC-1/THW 位相平面における同一追従時間割合とペダル操作：Participant D	75
図 4-11	1/TTC-1/THW 位相平面における同一追従時間割合とペダル操作：Participant E	76
図 4-12	1/TTC-1/THW 位相平面における同一追従時間割合とペダル操作：Participant F	76
図 4-13	1/TTC-1/THW 位相平面における同一追従時間割合とペダル操作：Participant G	77
図 4-14	1/TTC-1/THW 位相平面における同一追従時間割合とペダル操作：Participant H	77
図 4-15	1/TTC-1/THW 位相平面における同一追従時間割合とペダル操作：Participant I	78
図 4-16	1/TTC-1/THW 位相平面における同一追従時間割合とペダル操作：Participant J	78
図 5-1	リスク式の妥当性検証方法	83
図 5-2	先行車走行パターンと実験参加者の走行データ	85
図 5-3	1/THW-1/TTC 位相平面におけるブレーキ操作特性（Participant 1）	89
図 5-4	1/THW-1/TTC 位相平面におけるブレーキ操作特性（Participant 2）	89
図 5-5	1/THW-1/TTC 位相平面におけるブレーキ操作特性（Participant 3）	90
図 5-6	1/THW-1/TTC 位相平面におけるブレーキ操作特性（Participant 4）	90
図 5-7	1/THW-1/TTC 位相平面におけるブレーキ操作特性（Participant 5）	91
図 5-8	1/THW-1/TTC 位相平面におけるブレーキ操作特性（Participant 6）	91
図 5-9	1/THW-1/TTC 位相平面におけるブレーキ操作特性（Participant 7）	92
図 5-10	1/THW-1/TTC 位相平面におけるブレーキ操作特性（Participant 8）	92
図 5-11	1/THW-1/TTC 位相平面におけるブレーキ操作特性（Participant 9）	93
図 5-12	1/THW-1/TTC 位相平面におけるブレーキ操作特性（Participant 10）	93
図 5-13	1/THW-1/TTC 位相平面におけるブレーキ操作特性（Participant 11）	94
図 5-14	1/THW-1/TTC 位相平面におけるブレーキ操作特性（Participant 12）	94

図 5-15	1/THW-1/TTC 位相平面におけるブレーキ操作特性, 実験参加者別.....	95
図 5-16	アクセルオフとブレーキオン判断タイミングにおける RF 値の分布.....	96
図 5-17	アクセルオフとブレーキオン判断タイミングにおける $RF_{ind}$ 値の分布.....	96
図 5-18	アクセルオフとブレーキオン判断タイミングにおける $RF_{ave}$ 値の分布.....	97
図 5-19	検出閾値と検出の種類.....	97
図 5-20	各評価指標における検出件数.....	98
図 5-21	受信者動作特性曲線.....	99
図 6-1	SHRP2 データベースと RiskFeeling データベースの概要.....	104
図 6-2	各実験参加者のアクセルオフからブレーキオンへの踏み替え回数.....	106
図 6-3	実験参加者ごとのブレーキ操作特性 (Participant1~Participant15).....	107
図 6-4	実験参加者ごとのブレーキ操作特性 (Participant16~Participant30).....	108
図 6-5	実験参加者ごとのブレーキ操作特性 (Participant31~Participant45).....	109
図 6-6	実験参加者ごとのブレーキ操作特性 (Participant46~Participant50).....	110
図 6-7	各実験参加者のブレーキ操作特性 (全実験参加者, 50%ile 値).....	110
図 6-8	アクセルオフとブレーキオンの分離特性.....	112
図 6-9	受信者動作特性曲線 (ROC) における分離特性.....	113

## 表目次

表 2-1	研究手法の星取り表	25
表 3-1	実験的に求められた冪指数（参考文献(Stevens, 1961)より抜粋して作成）	32
表 3-2	ME 法による 1/THW の実験	33
表 3-3	ME 法による 1/THW の実験（車間距離を変化させた場合，車速 28m/s(100km/h)固定）	34
表 3-4	ME 法による 1/THW の実験（追従速度を変化させた場合，車間距離 20m 固定）	36
表 3-5	先行車接近の知覚実験のパラメータ	40
表 3-6	実験参加者ごとの単純反応時間	42
表 3-7	一定相対速度接近の実験条件	49
表 3-8	相対減速度接近の実験条件	49
表 3-9	接近度合で定義した刺激強度と主観的な評価値の近似曲線の冪指数と相関係数	51
表 3-10	1/TTC で定義した刺激強度と主観的な評価値の近似曲線の冪指数と相関係数	51
表 4-1	先行車接近のブレーキ実験のパラメータ	62
表 4-2	実験参加者のデモグラフィック特性	70
表 4-3	各実験参加者の走行時間と，追従走行時間	71
表 4-4	各実験参加者の 1/THW のパーセンタイル値	73
表 4-5	各実験参加者の 1/TTC のパーセンタイル値	73
表 5-1	実験参加者の属性	85
表 5-2	実験参加者ごとのブレーキ操作特性	95
表 5-3	検出特性とその定義	97
表 5-4	アクセルオフ，ブレーキオンの分別性能	99
表 5-5	正検出，誤検出の改善効果	99
表 6-1	実験参加者ごとの 1/THW と 1/TTC の 50%ile 値とその比率	111
表 6-2	RF と RF <sub>ind</sub> の分離性能	113

## 1 序章

### 1.1 研究背景

WHO の報告(World Health Organization, 2018)によると、2016 年の世界の交通事故の死亡者は年間 135 万人を超える。これは、23 秒間に 1 人が交通事故の犠牲者になることに相当する。また、この報告によると、年間交通事故死亡者数は、法整備や車両の法規制、緊急医療の進歩により交通死亡者数の増加はみられない。しかしながら、低所得国における交通事故の死亡率は、高所得国の 3 倍に達し、今後の低所得国の急激なモータリゼーションにより今後さらに増加することが懸念されている。

交通事故の 90%はヒューマンエラーによるといわれており(Treat, Tumbas, Mcdonald, Shinar & Hume, 1977), 交通事故を低減するための方策のひとつとして、自動運転 (AD, Autonomous Driving; Automated Driving) や運転支援システム (ADAS, Advanced Driver Assistance System) の開発が加速している。しかしながら、低所得国では自動運転に対応したインフラを整備したり、高度なセンサを搭載した自動運転車を普及させることは、早急の施策として困難である。したがって、普及のしやすさを考慮した場合、安価な運転支援システムは、引き続き交通事故対策において実現可能性と速効性の点で優れた手段であるといえる。

AD や ADAS を導入した場合に、交通事故の低減や安心した移動を期待できる一方で、適切なシステム設計がされていないと、ユーザーが使用時に違和感を覚えて使われなくなったり、システムの本来の目的と異なる使い方をされてしまう恐れがある。その結果、安全性の向上を期待してシステムを導入するも、導入の効果が目減りする可能性がある。

ここで、先行車追従時にブレーキ操作を支援するブレーキ操作支援システムの事例を挙げる。例えば、システムによるブレーキ操作が自分の意図したタイミングより早かったら、運転者は「ブレーキタイミングが早い」、「ブレーキの頻度が多い」と感じて、システムに対する信頼が醸成できない。反対に、システムによるブレーキ操作が自分の意図したタイミングより遅い場合は、「ブレーキのタイミングが遅い」、「安心できない」と不安を覚えるであろう。ブレーキ操作支援システムには、それを構成するレーザーレーダーやカメラなどのセンサが誤検知する可能性もあり、システムを過度に信頼すると、このような事象が発生した際に運転者が対応できなくなる可能性もある。

また、AD や ADAS を使用した際に、運転者や乗員が受ける印象に個人間差があることは想像に難くない。同一の個人であっても、運転環境、運転状態や健康状態、システムの状態

に応じて印象が変化することや、リスクホメオスタシス<sup>1</sup>などの課題も懸念される。

以上のことから、AD と ADAS の制御則は、運転者の感覚や運転行動に合致し、固定されたひとつの制御値で制御されるのではなく、パラメータ変更などで制御仕様を容易に変更でき、また時々刻々と変わる走行環境に対する運転者の運転感覚を連続的に表現することが求められている。

### 1.2 本論文の目的

本論文では、運転者の知覚特性を明らかにした上で、運転者の感覚に合致したリスク式、すなわち“個人適応型リスク式”を構築する。

リスク式の構築を行う状況としては、先行車追従・接近場面を対象とする。これは、事故分類の中で追突事故の割合が高く交通安全への貢献度が高いこと<sup>2</sup>、また、先行車追従・接近場面では AD と ADAS の普及率が高く、適用した場合の効果が高いこと<sup>3</sup>が理由である。

運転者のリスク感を評価する尺度を構築することができれば、これを自動運転・運転支援システムの制御則（アクチュエーターや表示）に活用でき、システム設計として簡便にチューニングすることが可能である。また、リスクという概念で運転者の運転行動を評価することも可能となり、幅広い活用が期待できる。

---

<sup>1</sup> リスクホメオスタシスとは、運転者の持つリスクの目標水準と知覚された交通状況のリスクを比較して、両者が等しくなるように行動を調節すること(芳賀, 2009)。

<sup>2</sup> 追突事故はアメリカの交通事故件数の20.9%(Bellis, E., & Page, J., 2008)、日本の交通事故件数の37.0%を占める(内閣府, 2016)。

<sup>3</sup> 自動ブレーキやACCの普及率は、2016年の日本における生産台数の66.2%と38.7%であり、現時点において普及が進んでいる(国土交通省, 2017)。また、この背後には、日本の政府は、自動ブレーキについて、2020年までに新車乗用車搭載率を9割以上とする目標を掲げていることがある。

---



## 2 運転行動における知覚と行為に関する知見

### 2.1 概要

本研究は、先行車追従・接近場面に関する運転者の知覚特性を明らかにし、その知覚特性に基づくリスク式を構築、検証することを目指している。詳細に入る前に、運転行動のメカニズムを大局的な観点から紐解き、以降の各章で検討するボトムアップ的な実験結果を様々な観点から考察できるようにしたい。

また、本研究では、幅広いアプローチ、具体的にはコンピュータ単体の台上実験、ドライビングシミュレータ実験、実車実験、Naturalistic Driving Study (NDS) から実験的な検証を行っている。それらの研究手法の特徴について触れる。

### 2.2 運転行動のメカニズム

自動車の運転は、認知・判断・操作のサイクルから構成されるといわれている(Rockwell, 1972)。また、このサイクルに知覚というプロセスを追加し、知覚・認知・判断・操作のサイクルとして取り扱う場合もある(大門, 2011; 稲垣, 2010)。この知覚プロセスにおける対象は、道路線形や自車両周辺の交通参加者を含む走行環境や自車の状況、運転者自身の状況などである。また、この知覚プロセスは、この運転行動のサイクルの起点であるともいえ、運転行動を調査する上で、重要なプロセスと考える。運転行動は時々刻々と変わる走行環境に対してリアルタイムに適切な操作が求められるため、運転行動を明らかにする上で走行環境と運転行動の関係を調べることは必要なアプローチといえる。

走行環境と運転行動の関係に関する象徴的な考え方として、Gibson and Crooks による“Field of Safe Travel (Gibson & Crooks, 1938) (図 2-1)”がある。これは、運転者の心理的なパスの可能性を示した概念図であり、1938年に発表された。以来、“Field of Safe Travel”は、定性的に走行環境と運転行動の関係を代表する図として、発表から 80 年以上経過した現在となってもたびたび引き合いに出されてきた(Abbink, Van Paassen, Boer & De Winter, 2018; Brown, Lee & Mcgehee, 2000; Hancock & Diaz, 2002; Kadar & Shaw, 2000; Papakostopoulos, Marmaras & Nathanael, 2017; Stoner, Wiese & Lee, 2003)。では、この図にある心理的な等高線は、どのような物理的な指標や計算式で表すことができるだろうか。本研究で構築するリスク式は、先行車に対するこの等高線を定式化したものであると解釈できるが、その実現のためには、さらに体系的かつ定量的に運転行動を捉える必要がある。

図 2-2 に Rockwell(1972)が提案している車両-運転-道路システムを一般化したブロック

図を示す。この図では、運転に関わる要因・影響の関係がフローとして示されている。認知や判断過程で、走行環境や車両、あるいは自己に対する監視機能、それに関わる運転態度・罰則・運転動機・ストレス・経験・技能などが関係していることが示されている。

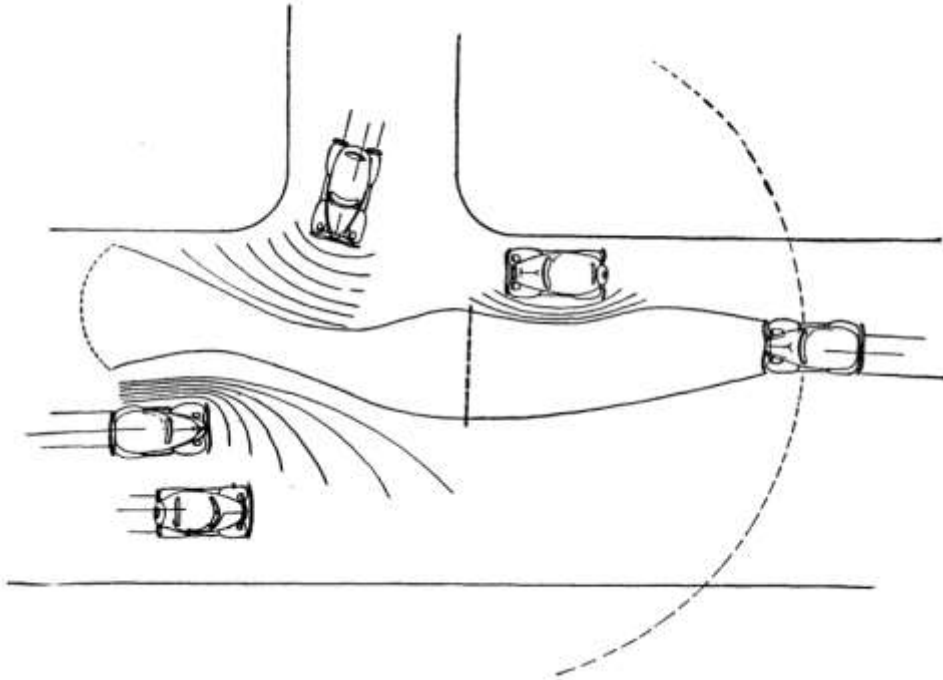


図 2-1 Field of Safe Travel<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> From American Journal of Psychology. Copyright 1938 by the Board of Trustees of the University of Illinois. Used with permission of the University of Illinois Press.

---

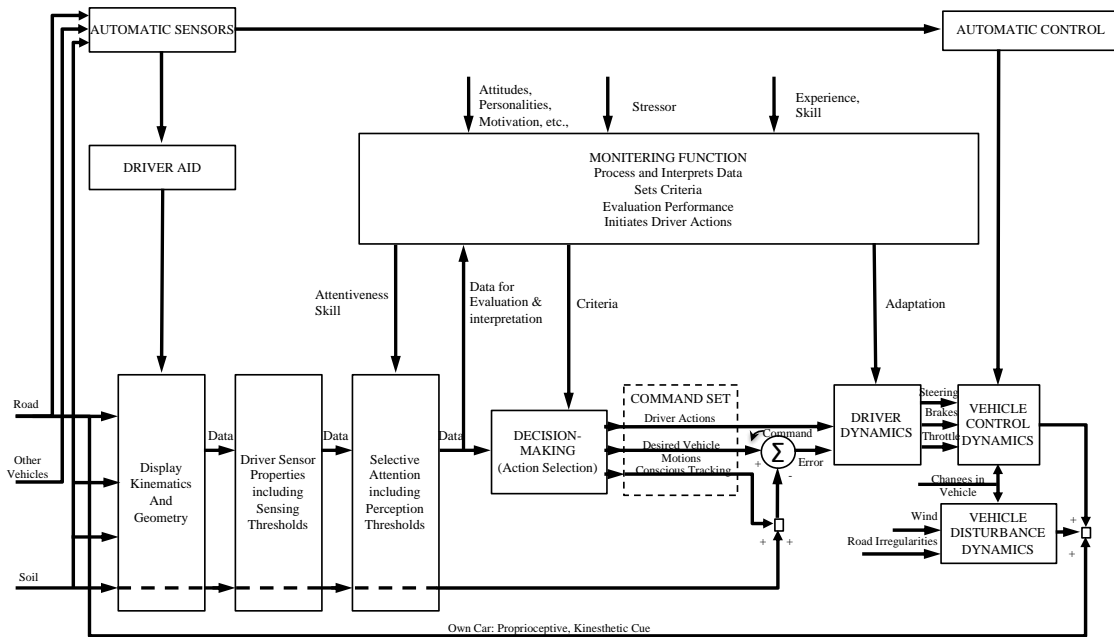


図 2-2 車両-運転者-道路システムを一般化したブロック図 (Rockwell(1972)を元に作図)

また、残りの認知～操作（運転行動）に至る過程では、走行環境が運転行動の大きな要因ではあるが、個人間差などヒトの特性に関わる要因の影響が小さくない。そのため、ヒト-クルマをシステム工学的に捉えて、運転行動との影響を明らかにする試みが活発に行われ、いくつかの運転行動モデル(Endsley, 1995; Fuller, 2005; Ranney, 1999)が提案されている。例えば、Fuller (2005)は、タスクデマンドと運転資源の領域モデル (図 2-3) を提案し、その中でタスクデマンド<sup>5</sup>と運転能力のそれぞれの決定要因の関係を表現した。図中のタスクデマンドでは、車速、車両状況、他の交通参加者、走行環境が要因となり得ることが示されている。また、運転能力は、生来の特性や教育・経験、運転技量、ヒューマンファクターが因子となり得ることを示し、運転者の覚醒レベルや活動レベルで決定されるといわれている。この運転能力の部分には、ヒトの特性を計測した際の個人内差や個人間差が含まれている。本章では、個人内差に関しては2.4、個人間差については2.5に詳細を記述する。

<sup>5</sup> タスクデマンドは、運転に求められる要求レベルであり、車両構造・性能、道路環境、交通状況、運転行動によって変化する (赤松, 2016)

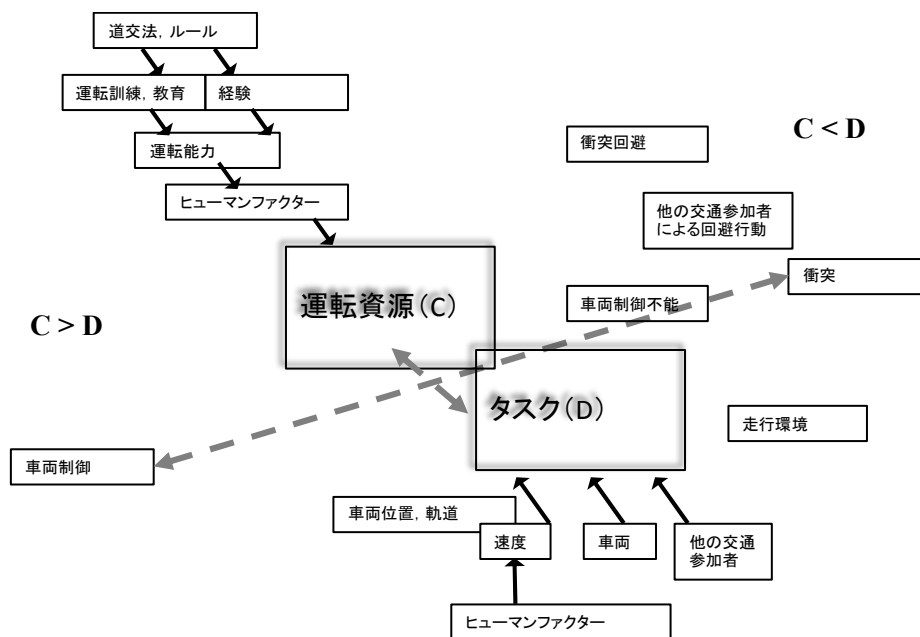


図 2-3 タスクデマンドと運転資源の領域モデル (Fuller, 2005)を元に作図)

運転としては最終的に運転資源がタスクデマンドより相対的に大きければ (図中の  $C > D$  の状態), 車両を運転できる状態であると考えられ, このような特性を用いて, 運転者の運転ワークロードを計測する方法(近藤, 山村, 久家, ペレス, 寸田, 2015; Nakayama, Futami, Nakamura & Boer, 1999)が提案されている.

また, 本研究が対象とした追従場面に特化した追従モデルの提案(Ranney, 1999)も行われている (図 2-4). このモデルでは, 混雑度合いに応じて, 個人間差の要因と運転状況の要因, 周囲の他車の要因の影響度合を表している. 道路が空いている走行環境では自由度が大きくなり, 個人間差や運転状況 (走行環境や個人内差) の影響度合が相対的に大きくなる. 一方, 混雑時にはこれらの影響度合が相対的に小さくなる. そして, 周辺他車の影響は, 混雑時は大きく影響してくることが示されている. 実際に, 自由な走行が可能な高速道路と, 通勤時間帯におけるラッシュアワーで, 追従時の車間時間 (THW) の特性が変わることを示した研究がみられる(Ayres et al., 2001). 走行環境違いでは, 霧が発生した際の THW の取り方についての研究が行われている(Saffarian et al., 2012).

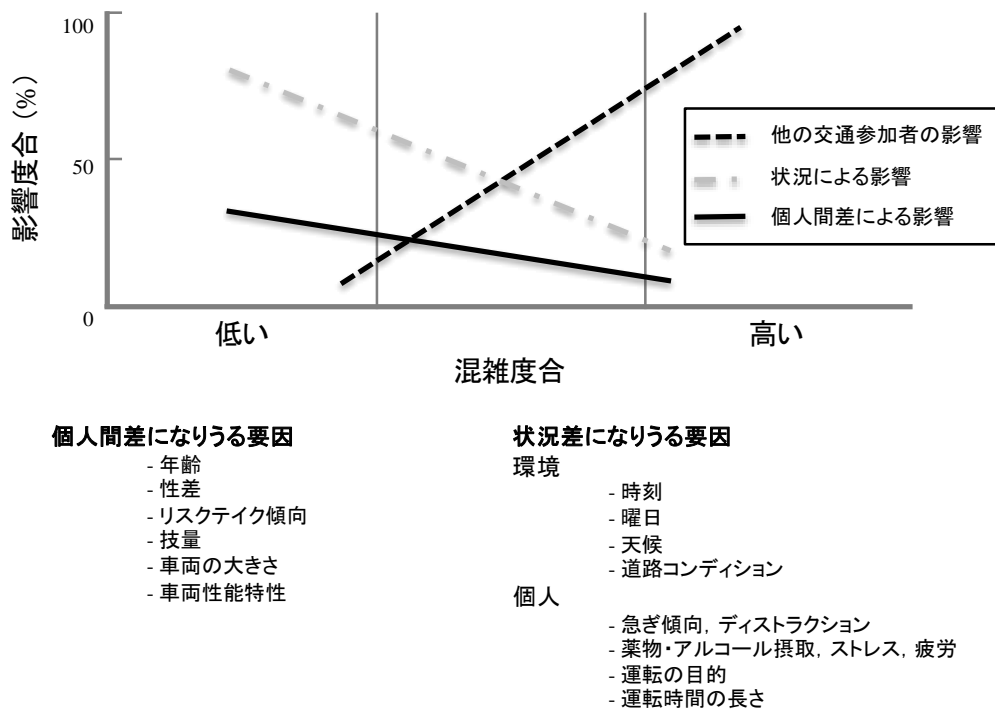


図 2-4 追従運転行動に影響を及ぼす要因 (Ranney (1999)を元に作図)

走行環境差は、時刻、曜日、天候、路面状況（乾燥路、雪道など）を示す。雪道の場合は、乾燥路に比べて車間距離を長く取る傾向は経験的に想像できる。

個人内差は、走行環境や運転者状態によって変わる個人内のばらつきを示す。走行環境による個人内差の一例は、閑散とした都市間高速道路（東名高速など）では車間距離が 30 m で追従運転していた運転者が、混雑した都市高速（首都高など）では車間距離 15 m で追従運転することである。個人内差に及ぼす運転者状態は、例えば、運転に対する運転動機、感情、居眠りなどがある。この個人内差に関して、運転者の運転負荷を検出する手段が開発されたり (Kondoh et al., 2015)、また、運転支援システムなどにより得られた安全性能を相殺してしまうリスクホメオスタシスによる課題(芳賀, 2009)も指摘されている。上記の個人内差は、一過性であるが、加齢のように長期的に変化する場合もありうる。詳細は、2.3 に記載する。

個人間差は、運転者間の運転行動の違いのことである。研究事例として、追従運転の車間距離の取り方や、先行車接近時のブレーキ特性の研究などが行われている。詳細は、2.4 に記載する。

### 2.3 先行車追従・接近場面における指標

先行車追従・接近場面の運転行動を表現する指標の検討は、様々な研究が行われてきた (Green, 2013; Kitajima, Marumo, Hiraoka & Itoh, 2008). 本節では、それらの指標を説明するために、まずは、本研究で考えている視覚から得られる情報について概要を説明し、グローバルオプティカルフローに関連する指標、ローカルオプティカルフローに関連する指標、その他の指標に分類して説明する。

#### 2.3.1 先行車追従・接近場面の視覚情報

運転に利用される外界情報のうち、90%は視覚情報から得られているという報告(Sivak, 1996)がある。この研究で得られた90%という値に関しては、一定の賛否があるが、運転する上で、視覚情報が主要な入力要素であることには疑いはない。

先行車追従・接近に関する運転者の知覚を理解するためには、先行車追従・接近知覚における支配的なパラメータを明らかにすることが肝要である。次に実際に、先行車追従・接近場面でどのような情報があるか確認する。図 2-5 に先行車追従・接近場面の概念図を示す。

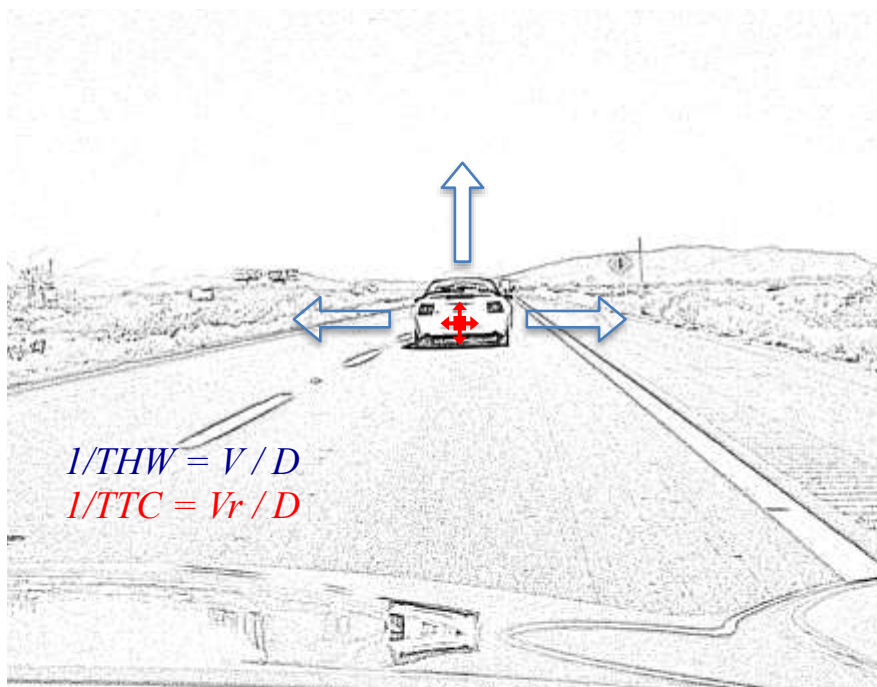


図 2-5 先行車追従・接近場面の概念図

図中には、先行車と走行環境の景色が描かれている。この図における走行環境として、道路の肌理、道路の車線境界線・中央線、道路標識、草原、山、看板、雲など様々な対象が確認できるかもしれない。次にオプティカルフローの種類観点で景色の情報を整理すると、

自車の速度で規定される走行環境のオプティカルフロー（図中 青の矢印）と、自車両と先行車（制御の対象となる物体）の相対的な関係から規定されるオプティカルフロー（図中 赤の矢印）の2つが考えられる。これらは、それぞれグローバルオプティカルフロー、ローカルオプティカルフローと定義され、人間の行動研究に用いられてきた(Bardy, Baumberger, Flückiger & Laurent, 1992; Bootsma & Craig, 2002; Kaiser & Mowafy, 1993)。グローバルオプティカルフロー（詳細は、2.3.2）は、自動車研究分野では、車間時間（THW, time headway）の逆数で定義され、生態心理学における行動研究では、TTP（time to passage）の逆数として定義されている。また、ローカルオプティカルフロー（詳細は、本章 2.3.3）は、自動車の運転行動研究の分野では、衝突余裕時間（TTC, time to collision/time to contact）の逆数で定義され、生態心理学における行動研究では、 $\tau$ の逆数として定義されている。いずれも指標も、時間と空間の両者を表現する指標となっている。

### 2.3.2 グローバルオプティカルフロー

グローバルオプティカルフローは、前述のとおり、車間距離と自車速に起因する指標である。すなわち、車間距離  $D$  と自車速  $V$  として、以下、式 (2-1) のように表現できる。

$$Global\ Optical\ Flow = \frac{1}{THW} = \frac{V}{D} \quad 2-1$$

また、“Field of Safe Travel（図 2-1）”を提唱した Gibson は、オプティカルフローが自己の移動を知覚させる(Gibson, 1979)としており、グローバルオプティカルフローは自己移動を検出する情報としても機能している。

$1/THW$  の逆数である THW は、自動車研究分野では車間時間とよばれており、先行車がいる位置に到達する時間を示す。人間の行動分析を行っている生態心理学では、この指標を TTP（time to passage）として定義されている(Bootsma & Craig, 2002)。この TTP を用いて、目標に向かって歩行するときの行動分析が行われている。また、自動車を取り扱う土木工学や交通工学における研究では、THW（車間時間）に類似した指標として車頭時間と定義(大口, 2000)しており、これは、先行車の先頭部と自車（後続）の先頭部の距離を自車の車速で除算している。この分野では、時間あたりの交通量などを計測するため、運転行動を調査するための車両間の距離ではなく、車両間隔を求めている。

ここで、従来の運転行動研究で、 $1/THW$  および THW が用いられた研究について紹介する。THW は、追従運転時の運転者の運転動機や目標の代用特性として用いられる。例えば、追従運転の運転者の動機と車間設定の挙動を THW で評価する研究(成, 谷口, 波多野, 松島, 2005b)や道路種別での比較をした研究(Brackstone & Mcdonald, 2007; 谷口, 1983)などがある。また、運転者の追従時の目標車間に関して、車間時間の平均値で表すことができる(成, 谷口, 波多野, 松島, 2005a)という研究がある。Serafin et al.(Serafin & Mclaughlin, 1998)は、高

速道路の追従時に、18名の運転者の好ましい車間距離を調べて、車速 65 mph (約 100km/h) 時に THW が 0.8-2.2 秒に分布していることを調べた。また、一方で、THW の主観評価は正確でなく、時間分解能として THW を捉えるのは困難である可能性が高いとの研究(谷田, 松永, 2006)もある。これより、時間分解能としての THW ではなく、空間分解能のオプティカルフローとしての  $1/THW$  として捉える必要があると思われる。

以上により、先行車追従場面において、グローバルオプティカルフローである  $1/THW$  は支配的な指標と考えられ、追従特性を表すのに  $1/THW$  や THW は様々な従来研究で用いられてきた。

### 2.3.3 ローカルオプティカルフロー

ローカルオプティカルフローは、本章 2.3.1 に記述したとおり、先行車（対象物）との相対速度に起因する指標である。自動車研究の分野では、 $1/TTC$  (TTC の逆数) として表現されることが一般的であるが、生態心理学の分野では、 $1/\tau$  ( $\tau$  の逆数) として扱われる。すなわち、車間距離  $D$  と相対速度  $V_r$  として、さらに対象物の先行車に対する視角の変化率 ( $\dot{\theta}$ ) と視角 ( $\theta$ ) として、以下、式 (2-2) のように表現できる(日本視覚学会, 2000)。

$$Local\ Optical\ Flow = \frac{1}{TTC} = \frac{1}{\tau} = \frac{V_r}{D} = \frac{\dot{\theta}}{\theta} \quad 2-2$$

$1/TTC$  は、運転者の視覚入力である接近する先行車の視角の変化率と等価であり、TTC は等速直線運動下（一定相対速度で接近した場合）の衝突までの時間を示す。TTC は、このように衝突するまでの実時間”time to collision/contact”として扱われる場合もあるが、本研究では、式 (2-2) で表されるような、ある時間における相対速度と車間距離から算出される TTC を意味している。そのため、本 TTC は、等速直線運動下でない場合に、実際の衝突するタイミングと同じになるとは限らない。

TTC 知覚に関する研究は、基盤的な知覚特性解明として、様々な研究が行われている。例えば、本研究で取り扱うような TTC の知覚量を定量化する研究(Hoffmann & Mortimer, 1994)や、どのような要因が知覚特性に影響を与えるかなどを検討した研究(Delucia, 1999; Delucia, Kaiser, Bush, Meyer & Sweet, 2003; Gray & Regan, 1998; Regan, 2002)がある。図 2-6 に  $1/TTC$  や TTC が用いられた様々な行動研究を示す。動物の行動研究では、鳩が枝に着地する際の行動(Lee, Davies & Green, 1993)のほか、鷹(Davies & Green, 1990)やハエ(Wagner, 1982)の着地、カツオドリの着水(Lee & Reddish, 1981)などの研究が知られている。また、ヒトの生活場面における行動研究では、スポーツ関連の研究が多数見られ、ボールのパンチング(Michaels, Zeinstra & Oudejans, 2001)、卓球の技能の差異(Bootsma & Van Wieringen, 1990)、野球(Oudejans, Michaels, Bakker & Dolne, 1996)、テニスにおける加齢の影響(Lobjois, Benguigui, Bertsch & Broderick, 2008)、歩行者が道路を横断する行動の研究(Lobjois & Cavallo, 2009)がみ



られる。自動車の運転場面における研究においても、制動操作の開始(Lee, 1976;森田, 大野, 関根, 2005)や状況認識の評価指標(鈴木, 菊地, 片山, 2003), 運転支援システムの効果の評価指標(Yamamura & Kuge, 1996)としての研究が行われている。

以上により、先行車接近場面において、ローカルオプティカルフローである  $1/TTC$  は支配的な指標と考えられ、接触を回避するような行動研究で  $1/TTC$  はたびたび使われてきた。以上により、 $1/TTC$  は、動物の行動研究指標として一般化された指標であるといえる。

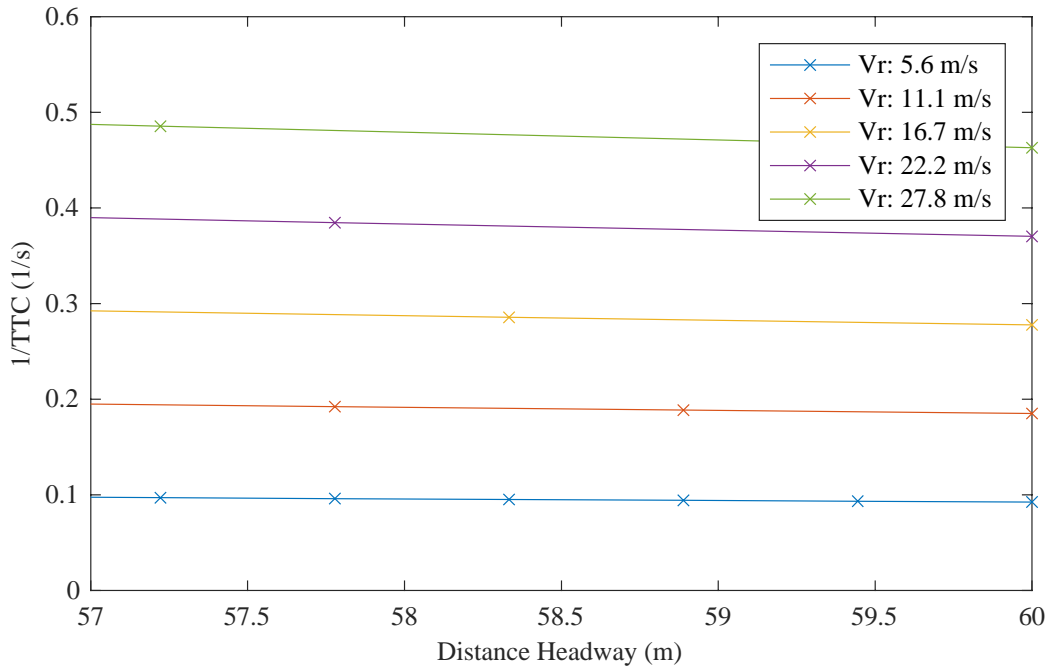


図 2-6  $1/TTC$ ,  $TTC$  が用いられた様々な研究

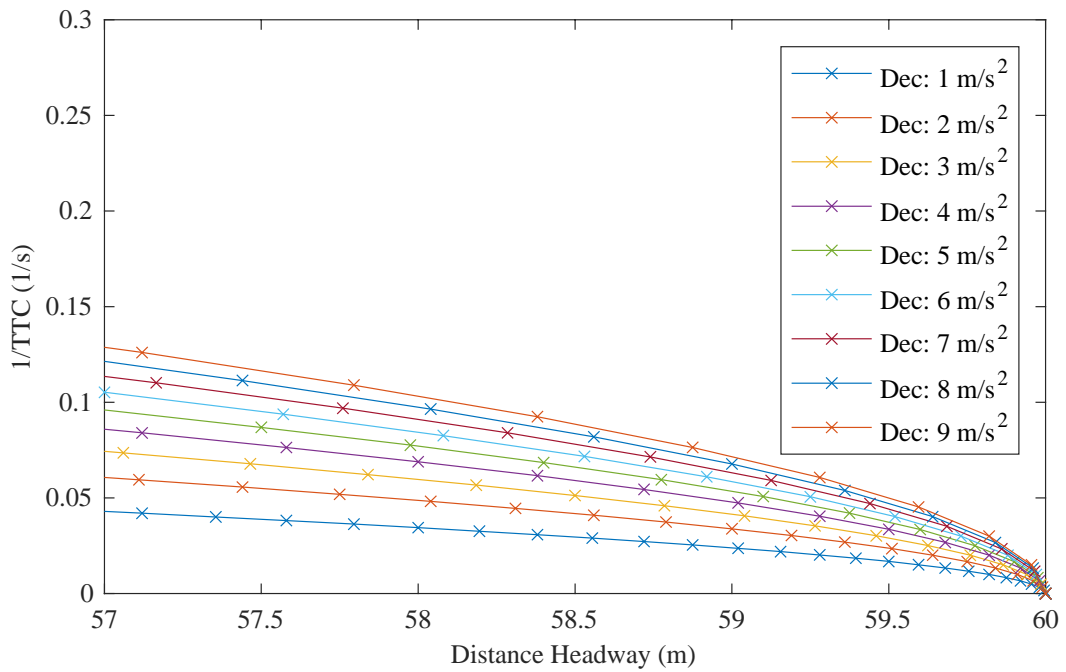
また、 $1/TTC$  は、式の特性上、原理的に車間距離が短くなるにつれ、または、先行車との相対速度が大きくなるにつれて、増加する。

図 2-7 (a)に、先行車と自車の初期車間距離が 60 m、初期車速が 27.8 m/s の状態から、先行車が相対速度 (5.6, 11.1, 16.7, 22.2, 27.8 m/s) で接近した際の  $1/TTC$  のふるまいを示す。図中の各 x は、0.1 秒ごとのプロットを示す。また、図 2-7(b)は、同一の初期条件から先行車が一定の減速度 (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 m/s<sup>2</sup>) で接近した場合接近した際の  $1/TTC$  のふるまいを示す。これらの図より、0.1 秒刻みの  $1/TTC$  の変化代は、相対速度の大きさ、あるいは、先行車の減速度に依存して、より大きくなることが読み取れる。

図 2-8 (a)と(b)に、初期車間距離が 20, 30, 40, 60 m、自車と先行車の初期速度が 27.8 m から、一定の相対速度 (5.6, 11.1, 16.7, 22.2, 27.8 m/s), または先行車が一定の減速度 (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 m/s<sup>2</sup>) で接近した際の  $1/TTC$  のふるまいを示す。図 2-7 同様、各 x は、0.1 秒ごとのプロットを示す。これらの図より、0.1 秒刻みの  $1/TTC$  の変化代は、相対速度の大きさ、あるいは、先行車の減速度に依存して、大きくなることが読み取れる。これは、式(2-2)で示されるように  $1/TTC$  は、相対速度と車間距離で決定するためである。

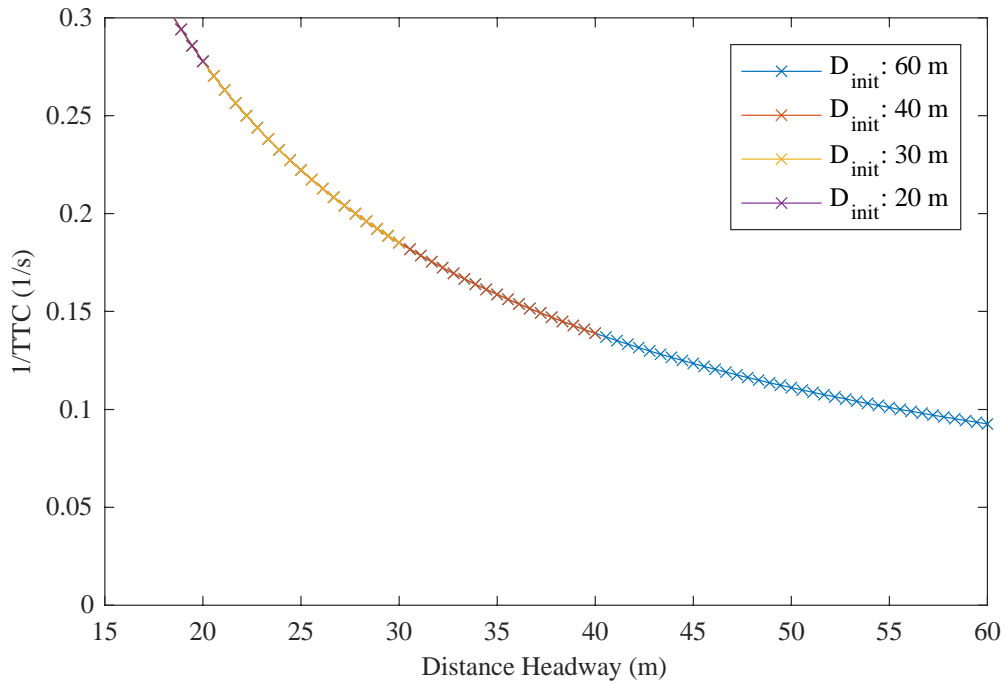


(a) 一定相対速度による接近

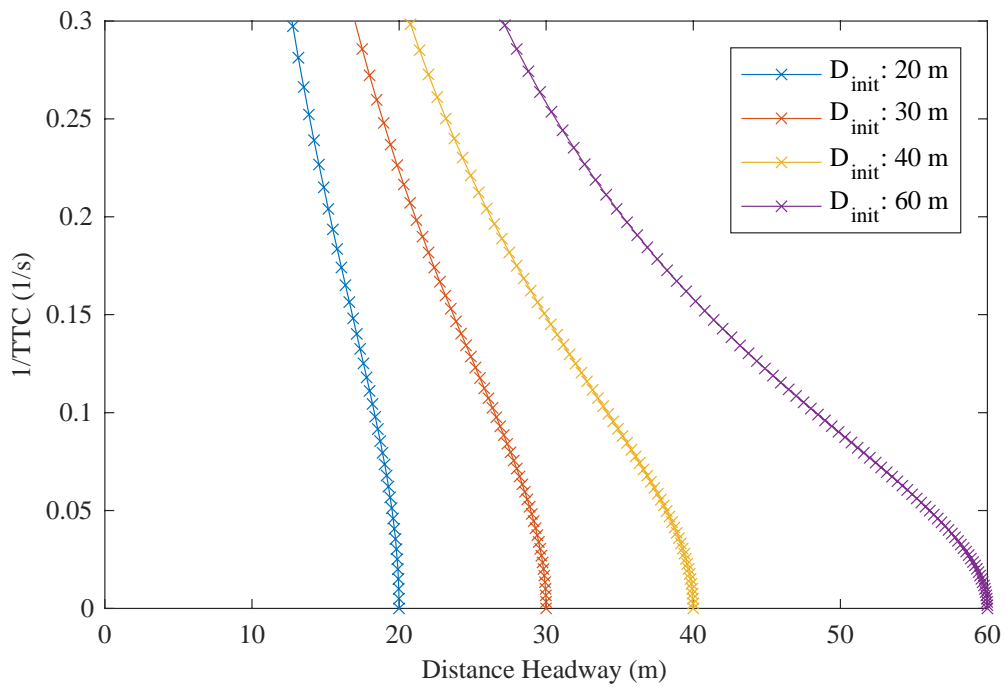


(b) 先行車の一定減速度による接近

図 2-7 初期車間距離 60 m から接近した場合の  $1/TTC$  のふるまい



(a) 一定相対速度による接近 (相対速度 20 km/h)



(b) 先行車の一定減速度による接近 (先行車の減速度 1 m/s<sup>2</sup>)

図 2-8 初期車間距離 20, 30, 40 60 m から接近した場合の  $1/TTC$  のふるまい

次は、先行車との相対速度が一定でない場合の  $1/TTC$  の特性について記述する。

$TTC$  は、2つの車両間の相対速度が一定である場合に「衝突までの時間」として定義される。しかし、実環境において、相対速度が一定であることは希であるため、一定速度で接近しない場合の  $TTC$  の扱いについての論争がある。Lee (1976) は、2つの車両間の相対速度が一定と仮定した場合、自車両の運転者の視覚システムとして、視対象の視角により  $TTC$  は直接特定されると主張した。相対速度が一定ではない場合に、前述した  $TTC$  は近似値としてその関係が維持されるとしている。これは、運転者が先行車に接近している際に時々刻々に変化する視角変化に基づき  $TTC$  を推定し更新することが出来るためとしている (Lee, Young, Reddish, Lough & Clayton, 1983)。運転行動研究において  $1/TTC$  や  $TTC$  を扱う研究が多々ある (Lee, 1976; 森田 et al., 2005; 森田, 関根, 岡田, 益子, 大野, 2005; 鈴木, 菊池, 片山, 2003; Yamamura & Kuge, 1996) にも関わらず、加減速度を含めた  $1/TTC$  知覚特性そのものに対する実験的な検証は十分ではない。

$TTC$  に関して、興味深い研究をここで紹介する。Lobjois ら (Lobjois et al., 2008) は、日常的にテニスを行ってきた高齢者と、日常的に球技を行っていない高齢者を用いて、 $TTC$  に対する反応を計測した。テニスのラリーでは、ボールを対象とする  $TTC$  に対して、連続的な反応が求められる。日常的にテニスを行ってきた高齢者は、球技をしていない高齢者に比べて、 $TTC$  に対する反応に対する加齢の影響は小さく、また、補償行動をとる傾向が示された。 $TTC$  は、ヒトの行動評価をする指標のみならず、技能向上や技能維持のための刺激量として活用できる可能性があると考えられる。

### 2.3.4 その他の指標

本項では、本章 2.3.2 と 2.3.3 で触れていない、先行車追従・接近場面における指標について、紹介する。

先行車の加減速度や先行車との車間距離、自車の車速の知覚特性を明らかにする研究は、かなりの歴史がある。

例えば、1966年に発表された Torf and Duckstein (1966) の研究では、実車実験で、車速およそ 40 mph (64km/h) で走行時に、初期車間距離約 77 フィート (23.5 m) から先行車を加減速させて、その加減速の知覚時間を測定している。この研究によると、先行車の加減速度の絶対値が大きいほど、知覚時間が早くなる特性が示されている。加減速度の絶対値が大きいことは大きな相対速度に達しやすい、すなわち、前述の知覚指標と考えられるローカルオプティカルフローである  $1/TTC$  (=相対速度/車間距離) が知覚可能な十分な大きさになっているとも解釈できる。実験結果としては、先行車の加減速度を後続車の運転者が直接視覚

から知覚することはできないこと、また、実験の加速度範囲が  $1-3 \text{ ft/s}^2$  ( $0.3-0.9 \text{ m/s}^2$ ) であることから、自動車の運転における加減速度の範囲として狭く、十分な検証に至っていない。

Torf とちょうど同じ年の 1966 年に Snider が行った研究(Snider, 1966)は、走行中の車間距離変化の閾値を調査した。その結果、車間距離が長くなるほど車間距離変化の閾値と閾値のばらつきが大きくなる特性が示されている。また、久家らの研究(1993)によると、停止中に 2 つの車両の車間距離の差があるかを相対評価した結果、基準距離に応じて判断が可能となる距離が長くなる結果が得られている。すなわち、これらの研究から、車間距離変化の閾値は、ウェーバー比のような特性をもつことが考えられる。また、停止中の距離知覚に関してマグニチュード推定法を用いて定式化を行い、冪指数がおよそ 1 になる研究(線形に見積もる)がある (Stevens, 1957)。一般的な距離知覚に関して、距離の手がかりが少ない環境では距離知覚の測定が安定せず、十分な視覚手がかりがある環境では比較的高い確度が得られる(近藤, 2000)との報告もある。一方で、走行している状態で先行車の距離を見積もったり、指定された車間距離で追従を行うと、距離の知覚に関してはかなり過小評価するようである(Rockwell, 1972)。以上、これらの研究から、距離知覚は、静止している場合は比較的に見積もれる可能性があるが、走行中の知覚は困難であると考えられる。

車速知覚に関する研究も古くから行われている。野口(1975)がまとめた論文によると、ドライバの速度感は、主観的な速度の印象であり、「メンタルスピードメーター」と称して、不安定で不正確であることを報告している。Denton(1966)では、基準の速度に対して、2 倍、もしくは半分の車速にするように求めたが、2 倍の車速にする条件の時には速度を過小に見積もり、半分の車速にする条件は過大に見積もる傾向がみられた。類似した結果として、Fildes ら(1989)は、呈示され制限車速に対して、15%上回る速度は理想的であると判断され、また、制限速度 15%下回る速度は遅すぎると評価を得ており、速度推定誤差は、低速より高速のほうが大きいことを示した。さらに、この研究では、車速知覚は一般的に夜間で安全性に乏しくなり、昼間と比べて夜間の推定される車速の誤差が大きくなることが報告されている。これは、夜間の情報量(光が当たっている物体か、自光する物体のみしか認識できず、相対的にオプティカルフローとなりうる対象が少ない)が昼間と比べて乏しくなることが要因と考えられる。また、速度知覚の特性として、道路の質が高い場合に、砂利道と比べて車速を低く見積もりやすいことが指摘されている。これは速度感や速度知覚は、運転負荷の影響や運転者の情報処理の影響を受けやすいことが考えられる。これらの車速知覚に関する研究を総括すると、周囲の走行環境を含めた速度感、図 2-3 に示すような運転負荷を含めた速度感が結果として評価されるようであり、速度そのものが評価される研究になっていないこと、速度感そのものは精度が高くなく周辺の走行環境(情報の多さ)に大きく影

響を受けるようである。一方で、Semb(1969)は、3つの速度知覚の実験をマグニチュード推定法から定量化している。この研究では、(1) 観察者を横切るように走行する速度、(2) 他車が観察者に向かってくる速度、(3) 観察者自身が体験する速度の知覚を行い、それぞれ、1.0, 1.35, 1.45 という冪指数を報告している。本研究の対象の追従・接近シーンで、(3) に相当する。冪指数が1以上であるため、小さな車速の変化には気づきにくく、一方で、大きい変化には、過敏になる特性を持つ。前述のメンタルメーターや、速度への慣れを考慮すると、この結果も絶対的な速度知覚は不安定な可能性が示唆される。総じて、速度に関する速度感や定量化は、運転中にドライバーは、速度そのものを正確に捉えられないことを示している。

次にタウドットという指標について考察する。Leeらの研究では、ブレーキ制御(Lee, 1976; Yilmaz and Warren, 1995)や鳩が着地する際の減速行動(Lee et al., 1993)において、タウドットが一定(TTCの微分値が-0.5一定)になるように制御されているという研究がある。ただし、タウドットがどのように知覚され、それを維持するように制御されているのかについては懐疑的である。また、タウドットは、タウ(衝突までの残り時間)という時間を微分したものであり、行動トリガーとしての利用の現実性が乏しいと考えられる。また、タウドット一定説は、減速時の速度プロファイルをモデル化であり、行為者の行動メカニズムを表現した結果ではないと考えられる。

このほか、ヒトの視覚入力による刺激の観点から評価しようとする試みがある。奥野(1998)は、追従運転中は、視角の変化( $\theta$ )が小さいため、車間距離が長くなると認知が困難になることを提起している。また、先行車追従・接近場面の先行車の「みえ」の面積の時間変化をdBとして指標とするKdBが提案されている(伊佐治他, 2007)。すなわちKdBは、次元として1/TTCの2乗になりオプティカルフローとは異なる考え方である。

以上の研究は、オプティカルフローをベースとする本論文と異なる。ヒトの視覚入力とみなせる指標は何か、本論文では、その点について実験的に明らかにする必要がある。

### 2.3.5 1/TTC-THW 位相平面における先行車追従・接近場面

本研究では、オプティカルフローを由来とする1/THWと1/TTCの2つの指標を用いて、先行車追従・接近場面における運転者のリスク感を表現することを試みる。本項では、この両者を組み合わせた平面におけるふるまいと運転行動を確認する。また、先行研究の中では、この両者の組み合わせによるTHW-1/TTC位相平面上で、運転行動を説明する研究(Goodrich, Boer & Inoue 1998; Kuge, Yamamura, Boer, Ward & Manser, 2006; Van Winsum & Heino, 1996)が行われている。

図 2-9 に追従接近時のふるまいと運転操作の関係を1/TTC-THW位相平面に示す。この

平面上では時系列としてみた場合に、反時計回りに動いていく特性を持っている（図中で i → ii → iii → iv）。追従・接近運転のプロセスを記述すると以下ようになる。

- 先行車が接近し始めると（図中 水色の線の右端）、THW が減少し 1/TTC が増加する
- 運転者は、1/THW の変化または 1/TTC 変化により、先行車の接近に気づき、その後、アクセルペダルを離す（図中 i ×）。
- さらに接近状態（THW が減少、1/TTC が増加）が続くと、あるところでブレーキを踏む（図中 ii ○）。ブレーキ操作で 1/TTC の増加が抑えられ減少に転じる。徐々に THW の増加が始まる。
- 1/TTC が負に転じる（接近状態から離脱状態に転じる）と、ブレーキペダルを離す（図中 iii ×）。
- その後、離脱状態が続き、ある THW になると目標 THW にむけた追従に戻るためにアクセルペダルを再び踏む（図中 iv ○）。

図 2-10 に上記の循環的な事例（同一車両に追従運転を続けている場合）を示す。図中の運転者の THW の 50%ile 値は、1.2 s であった。よって、この運転者は、1/TTC がゼロ（相対速度ゼロ）、かつ、目標 THW（図中の #, 1.2 s）を維持しようとしていたと推測できる。すなわち、ある THW を目標にした追従運転を 1/TTC-THW 位相平面上で表記すると、目標 THW（図中 #）を中心に反時計回りの軌跡が描かれる。また、追従運転場面と運転行動（例えば、アクセルペダルやブレーキペダル操作による表現）の関係は、THW の 50%ile を中心とした 1/TTC-THW 平面にプロットされる。

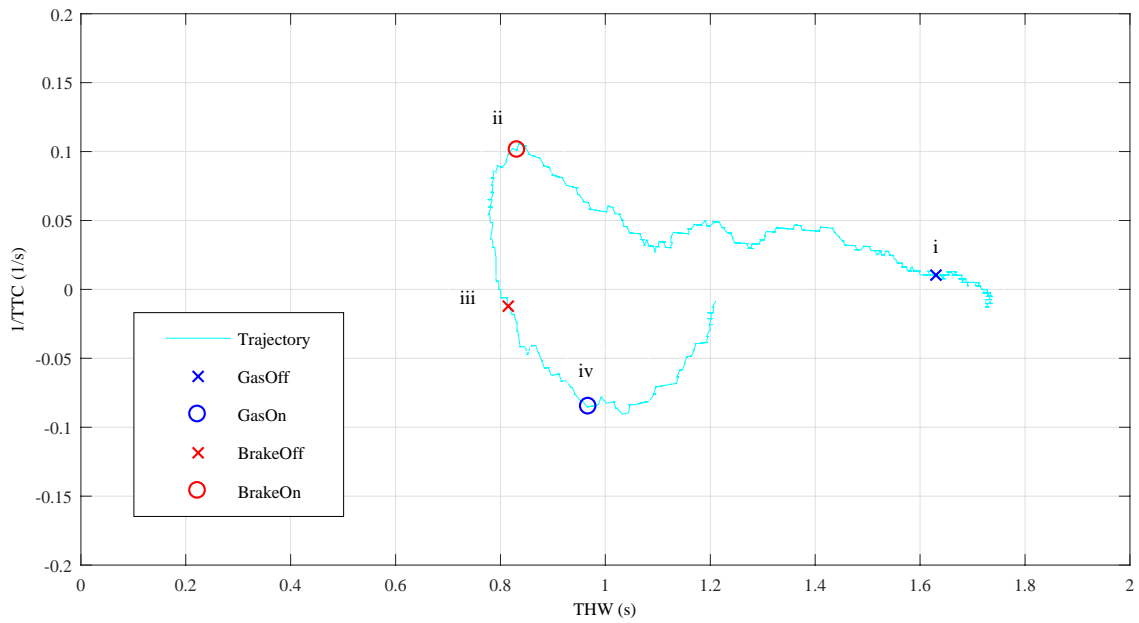


図 2-9 典型的な追従場面とペダル操作

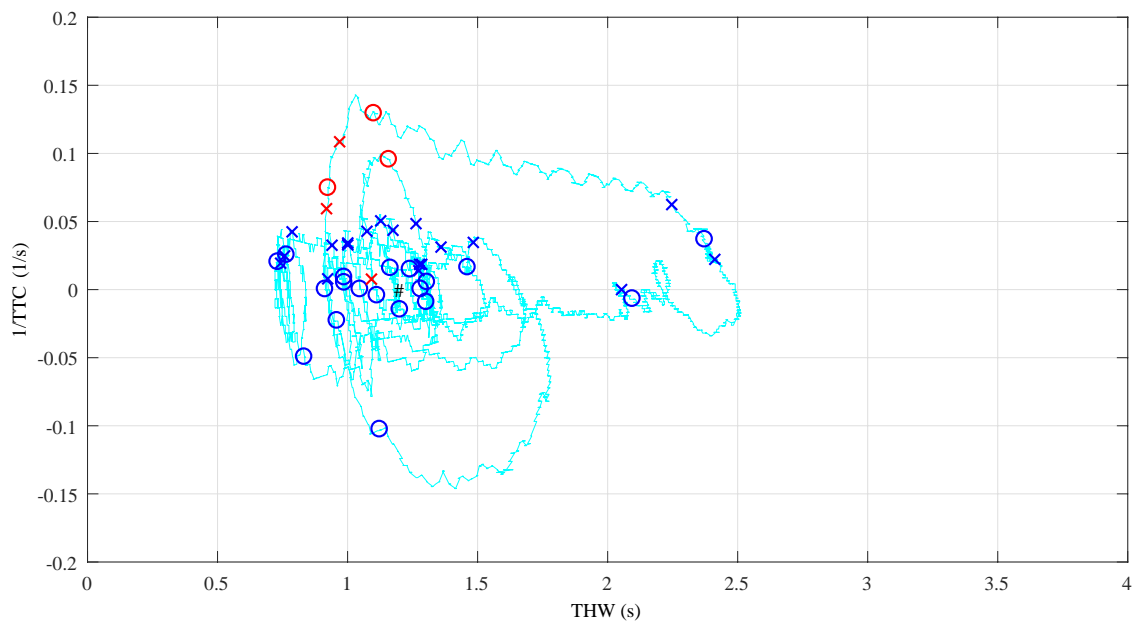


図 2-10  $1/TTC$ -THW 位相平面上における追従運転のふるまい



## 2.4 個人内差

ヒトを扱う研究において、ヒトのばらつきの要因のひとつとして個人内差がある。個人内差は、同一の運転者であっても、異なる特性が表れることである。繰り返し行う単純反応タスクを行った場合の反応時間や操作のばらつきも個人内差に含まれるが、運転行動研究において、より重要になるのが、気分や体調による変化、運転状態・走行環境・走行時間・走行時刻などによる異なる条件下の変化である。このような個人特性の一過性の変化に加えて、長期間の変化として、走行開始からの時間、日、週、年単位で変化が認められたり、加齢とともに変化することもありうる。

たとえば、心理的な要因として運転動機、身体的な要因として飲酒・睡眠・疲労・運転以外のタスク（運転中の携帯電話使用など）の遂行・怪我などによる身体の不自由さなどが影響を及ぼすこともあろう。覚醒度低下や運転中の携帯電話使用などによる一過性の個人内差を捉えることで、これらの運転者状態を推定・検出する手法(Kondoh et al., 2015; 近藤他, 2015)が提案されている。また、運転支援システムの使用によって運転行動変容が生じることも考えられる。安全性向上を期待し運転支援システムを導入すると、運転者は運転に対して怠慢になり、結果として運転支援システムによる安全性の向上代が目減り、あるいは、相殺されることである。このような問題はリスクホメオスタシス(Wilde, 2009)とよばれており、運転支援システム導入の際に、実用上の安全性評価で問われる課題である。同一運転者の長期間の運転行動変容の研究として、加齢の研究(Sato & Akamatsu, 2015)が行われている。この研究では、運転行動における加齢の影響を直接観察することができ、今後の高齢化社会に有用な研究と思われる。

## 2.5 個人間差

ヒトを扱う研究でたびたび議論にあがるのが個人間差の問題である。人-システム系の研究で個人間差の検討が必要な理由は、個人ごとの特性の違いによって機械システムの使い勝手が変わることや、個人ごとでシステム使用時におけるシステムの効果の差を出にくくするためであり、設計段階でも評価段階でも個人間差の観点での検討が必要となる。個人間差は、本章2.2の図2-2～図2-4の各運転行動モデルを確認すると、運転に対する態度・人格・運転動機、習熟度（運転、車、走行環境など）、教育・運転技能などがあると考えられる。

以前から、運転行動において生じる個人間差の特性を探るために、運転に対するアンケートによる調査方法（たとえば、DBQ（Driver Behaviour Questionnaire）(Reason, Manstead,

Stradling, Baxter & Campbell, 1990), DSQ (Driving Style Questionnaire) (石橋, 大栗, 赤松, 2004), WSQ (Workload Sensitivity Questionnaire) (石橋, 大栗, 赤松, 2004) が提案されている。しかしながら、運転に関係するアンケート結果と運転行動の相関を求めることによる方法は、一定の成果はあるものの、実用できるほどに個人間差を明確に特定するまでに至っていないと思われる。アンケートによる調査では、評価者それぞれで評価軸や評価価値に対する捉え方が異なることが考えられ、結果的にアンケート結果と運転行動の間での乖離が生じやすいと考えられる。

一方、運転行動そのものから個人間差を示した研究は、以前から様々行われてきた。例えば、追従時の車間距離に個人間差があること (Fancher, Sayer & Bareket, 1996; Serafin et al., 1998) や、操舵操作の滑らかさに個人間差があること (McClean and Hoffmann (1975); Nakayama et al., 1999; 中山, 二見, 中村, ボアー, 1999) が知られている。このような運転行動の個人間差は、運転支援システム構築時には学習する機能を導入すること (Hirose, Sawada & Oguchi, 2004) や、個人同定する機能 (近藤, 山村, 久家, ペレズ, 2015) が検討されている。前述のアンケート調査によって個人適合する方法もあるが、実際の行動特性を計測し、個人間差を吸収させる手法の方が客観性の観点から優れていると考えられる。

## 2.6 知覚-行為システム

本論文の題目に掲げた「知覚-行為システム」とは、環境に対して動物（人）が様々な器官を用いて知覚し、行動（行為）する、動物の内在的で複雑な意思決定を含む仕組みである。そのため、運転メカニズムの解明は、知覚-行為システムの一様相を調査することと捉えることができる。知覚-行為システムで、運転に特筆すべき特性が、相補性とアフォーダンスである。

相補性とは、知覚-行為間の相補性のことである。運転教本や工学の分野では運転という行為は、(知覚) → 認知 → 判断 → 操作 (行為) の繰り返しといわれ、知覚が起点になり、操作 (行為) は、刺激に対する結果と捉えるのが一般的である。一方で、Gibson は、“we must perceive in order to move, but we must also move in order to perceive (私たちは知覚するために動き、動くために知覚しなければならない)”と相補性を提案 (Gibson, 1979; 三嶋, 2013) している。自動車の運転のドライバモデルは、フィードバックループとして表現されることを考えると、運転行動に知覚-行為システムの相補性を垣間見ることができる。また、「見る」、「確認する」、「試す」という行為そのものが、知覚するための行為であり、知覚-行為システムの考え方は、これを明示的に表現している。

アフォーダンスは、個人間差を含めた運転環境と運転行動の関係を明らかにする考え方

---

のひとつである。以下に、三嶋 (2012)による説明を引用する。

生態心理学者のジェームズ・J・ギブソン (James J. Gibson) は、このように、私  
たちを取り囲む環境の「意味」や「価値」— これは「アフォーダンス」(Affordance)  
と呼ばれる — が、私たちの認知過程によって内的／心的に付与されるのではな  
く、環境に実在するものとして直接的に知覚されるとする「直接知覚」論を提唱  
した。伝統的な感覚の理論では、私たちの感覚器は、外界の物理的刺激のみを入  
力できる — 違う言い方をすれば、物理的なものを越えた心理的存在である「意  
味」や「価値」は入力されず、後に認識者によって付与される必要がある — と  
の仮定から成立している。それゆえ、より高度な知覚や認識は、それを材料にし  
て内的／心的に構成されるものとされる。

アフォーダンスの考え方で重要なのは、環境の「意味」や「価値」を捉えることである。  
2.3 で解説したオプティカルフローに関する指標 (1/THW や 1/TTC) は、あくまで外界の物  
理的刺激 (外界情報) であり、環境の「意味」や「価値」は含まれていない。ここで「意味」  
や「価値」とは、個人内差 (2.4)、個人間差 (2.5) が大きく影響する。それでは、どうやっ  
て環境の情報にその「意味」や「価値」を発見すればよいのか? 生態心理学の分野では、ヒ  
トの内在的な指標 (intrinsic metrics) として  $\pi$  値という考え方がある。 $\pi$  値研究は、複雑な  
特定の“行為者-環境システム”を、次元解析と相似則を適用させて、多くの変数から成る  
システムを無次元化する手法である ( $\pi$  値研究) (Warren, 1995)。すなわち、行為者の特性  $A$   
は、環境の特性  $E$  を評価するために利用され (式) 2-3,  $A$  と  $E$  は同一の次元・単位で比率  
として表現される (同一の次元・単位で除算しているため、次元はなくなり、比になる)。

$$\pi = \frac{E}{A} \quad 2-3$$

具体的な研究として、段を上れるか／上れないかのヒトの判断を生態学的な観点で検証し  
た研究(Warren, 1984)である。この研究では、2つのグループ、背の高い男性 (身長  
の統計値の 98%ile 相当) のグループと背の低い男性 (2%ile 相当) のグループを作り、異なる高さの  
段が上れるかどうかの判断をしてもらった。背の高いグループと背の低いグループでは、  
“上れる (climbable)” と判断した参加者の割合は、段の高さによって異なる結果が示され  
た。次に、段の高さ ( $R$ ) を足の長さ ( $L$ ) で割った指標 ( $\pi$  値) に変換すると、背の高いグ  
ループと背の低いグループの“上れる (climbable)” と判断した割合がほぼ一致する。すな  
わち、行為者の体格を考慮し、外界の情報を評価すると、背の高さというヒトの体格の特性  
を超えて、ヒトの判断を推定することができるようになる。

また別の  $\pi$  値研究として、ヒトが横に掛け渡された棒に対して“またぐ”か“くぐる”か  
の判断に関する研究(三嶋, 1994)や、狭い幅を通り抜けられるか (間隙通過, passability) の

判断に関する研究がある(Warren and Whang, 1987). 間隙通過の研究では, 車椅子を使った拡張した身体への展開(Higuchi, Cinelli, Greig & Patla, 2006)や, バーチャルリアリティ上で間隙通過(Craig & Watson, 2011), 間隙の形成方法の違いによる判断特性の検討(Flascher, 1998; 友野, 古山, 三嶋, 2017)も行われている. 以上より,  $\pi$ 値はヒトの行動の可否判断を検証する上で実証的な研究アプローチであると考えられる. ただし, 従来の $\pi$ 値研究を調査すると, 環境特性と体格の特性に関して, “高さ”, “長さ”, “幅” など, 空間的な大きさに関連する寸法が使われることが多いようである. また, ヒトの運動に対して, 2つのタウの組み合わせで分析する方法論(Lee, 1998)が提案されており, この知覚-行為システムの考え方に準じていると考えられる.

$\pi$ 値研究は, 生態心理学の分野における環境情報の特性と行為者の特性から表現した研究方法である. 自動車の安全研究においても(Brown & Groeger, 1988)が, リスク認知への主な入力情報として, ①走行環境の潜在的なハザードに関する情報と②事故になり得るハザードを避けるための運転者と車両が統合した能力の情報があると報告している. また, Moriceらは最大車速(Morice, 2010)から, Martiは限界の時間(Marti, Morice & Montagne, 2015)から, 車両特性と行為者の行動判断を説明しようとする試みがみられる.

行為者の特性に関する実体験として, 運転者ごとにリスクの感度は異なり, そのリスクの感じ方の違いにより, 運転行動に差異がみられる. たとえば, 友人の運転する助手席に同乗した際に, 友人の運転に違和感を覚える(遅いブレーキなど)のは, このリスク感度の差異(環境に対する「価値」や「意味」が異なる)の現象のひとつと考えられる.

以上, 運転行動は, 知覚-行為システムを利用している営みのひとつであるといえる.

### 2.7 運転行動理解に用いるツール

本研究は, 運転行動を理解した上でリスク式の構築を行うため, ヒトの知覚特性という基礎研究から, より実用的な運転特性の検証まで含んでいる. このような幅広い検証をするためには, 相応の実験デザインにすることが, 研究結果の質の向上に繋がる. そこで, 運転行動理解の分野で一般的に用いられる研究手法について, それぞれの特徴を以下に明らかにする. 表 2-1 に各研究手法の星取表を示す.

#### <アンケート調査>

アンケート調査は, 様々な運転に関する質問に対して対象者が自省的に報告することである. 運転者の率直な考えや評価を収集できるものの, 個人それぞれで評価方法が異なることもあり客観性に乏しい. そのため, 評点を絶対評価するもの(たとえばSD法)は, 評点

のレベリングをする必要がでてくることもある。デブリーフィングは、実験者が実験参加者の様子を見ながら評価を引き出すことが可能であるが、評価を誘導する可能性がある。

### <台上実験>

台上実験は、キャビンを伴わない PC ベースの実験である。DS と比べて、運転環境としての構成が簡素なため、ディスプレイ装置の自由度が高く、高性能なディスプレイを選択可能である。そのため、心理学的実験や本研究における先行車の挙動の知覚実験には向いた実験装置である。一方で、運転している臨場感に乏しいため、運転に近い状況での評価や運転操作の計測には不向きである。

### <ドライビングシミュレータ (DS, Driving Simulator) 実験>

DS 実験の利点は、安全性を確保しつつ、再現性が高い実験ができることである。たとえば、安全性でいえば、事故リスクのある実験（障害物への衝突リスク、低 $\mu$ 路の走行、居眠り運転を誘発する実験、飲酒状態での走行実験）も実行可能であり、また、再現性の点では同一の実験条件で繰り返し実験が可能である。例えば、先行車が車間距離 50 m から 1.5 m/s<sup>2</sup> で減速する場面において、運転者のブレーキタイミングを測定する実験では、先行車の条件を正確に繰り返し再現することは実車実験では難しい。

DS 実験における注意点として、DS 実験は、実験参加者自身の運転行動が全体のシナリオに組み込まれていることや、台上実験で行われるような心理学的実験に比べると不確定な要素はるかに大きいこと(赤松, 2016)などがある。

### <テストコース実験>

テストコース実験は、比較的安全性を確保でき、実車そのもので評価可能である。DS 実験は様々な走行環境を模擬的に再現することが可能であるが、テストコース実験ではかなり限定された走行環境における実験になる。近年、テストコースであっても市街地の再現などを試みた事例もある（例えば、日本自動車研究所の J-town, 米国ミシガン大学交通研究所の M-city, 米国バージニア工科大学交通研究所の Automation Park など）。実車を使う以上、安全性への配慮が必要である。テストコースでの実験は、現実の走行場面に近いデータを求めるより、特定の場面における挙動計測や評価に向けた手段である。

### <公道実験>

一般公道で行う実験で、テストコース実験と異なりバリエーションに富んだ走行条件が含まれるため、現実の走行場面に近いデータが計測可能である。ただし、実験参加者は、普

段運転している車両とは異なる実験車を運転していること、実験目的で運転していることを理解した上で走行するため、普段の運転行動の計測や所望の評価ができるとは限らない。また、一般の交通参加者の交通の妨げになるような実験、安全性が確保できない実験は不可能であり、実験計画時点で公道実験を行う必要性を十分に検討する必要がある。

### < 定点観測 >

定点観測は、道路の特定の場所にカメラやセンサーを設置し、その場所を通過する車両の挙動を計測する方法である。比較的大量のデータを短期間に計測することが可能であるが、一方で個人の特定が困難であること、運転行動そのもの（ステアリングやペダル操作）の計測が困難であること、場所に依存したデータになることが考えられる。また、カメラ設置に制約がある実路では画像から定量的な指標を求めるのは簡単ではない(赤松, 2016)ともいわれている。しかしながら、今後は、AI などを用いた画像認識技術を使うことにより、より簡便な計測が可能になると思われる。

### < NDS (Naturalistic Driving Study) >

Naturalistic Driving Study (ナチュラルリスティックな運転行動研究) は、実験参加者の所有する車両に計測器（ドライブレコーダーやセンサー、カメラなど）を追加し、ユーザーの車の使い方そのものを研究する取り組みである。最初の大規模な NDS は、米国で行われた 100car Study (Neale et al., 2005) である。この研究では 100 台の車両の用いたデータ計測が行われた。NDS は、アメリカで盛んに行われているが、カナダ、欧州、中国、オーストラリアなどでも行われている。最も大規模な NDS として、SHRP2 NDS (Second Strategic Highway Research Program, Naturalistic Driving Study, (Perez et al., 2016)) がある。SHRP2 NDS は、3500 人以上の運転者に 1 年、もしくは 2 年の走行データを記録したものであり、運転行動の宝庫といえる。NDS では、特定の運転者特性を測るプロジェクト（ティーンエイジャー (Lee et al., 2011) など）も行われている。

NDS では、多様な運転場面、様々な実験参加者が含まれるため、個人間差や個人内差などの特性が明らかにできることが可能である。一方で、多様な運転場面が含まれる故に所望の場面の抽出が難しく、所望の場面をうまく抽出する技術が必要である。

近年、FOT (Field Operating Test) が盛んに行われるようになってきたが、FOT は特定の走行コースを走行や実験車を使った実験を行うことから、NDS とは言いがたい。NDS は、“naturalistic: 自然を如実に模すこと” であり、実験参加者が所有する車を用いて、可能な限り自然な運転の調査を目指した研究である。

表 2-1 研究手法の星取り表

特性		アンケート	PC ベースCG	キャビンつきDS	テストコース	公道	定点観測	NDS
		主観評価	基礎特性		← 行動評価 →		ナチュラル	
		実際の行動とは乖離?	ヒトそのものの特性, 再現性に富む	運転特性, 再現性に富む.	実車, 非現実下の評価	限定された現実環境, 再現性乏しい	多様かつ膨大なデータ. 場所依存	多様かつ膨大なデータ
原理検証	知覚・認知特性	×	◎	◎	○	△	×	×
	行動特性	○	△	◎	◎	○	△	△
受容性評価		◎	△	○	○	○	×	△
多様性検証	個人内差	△	△	△	△	△	×	◎
	個人間差	△	△	△	△	△	×	◎
	全体のばらつき	○	×	×	×	×	◎	○
	場所の差	○	×	×	×	△	△	○

## 2.8 論理的な構成

本研究の研究課題 (RQ) は、「先行車追従・接近場面における運転者の知覚-行為システムに基づく個人適応型リスク式の開発」である。本節では、リスク式の開発に至るまでの課題を先行研究の知見をふまえて整理する。図 2-11 に本論文の構成を示す。

リスク式は、先行車に対する運転者の主観的なリスク感を定式化したものである。すなわち、先行車の挙動の情報と運転者のリスク感覚量の関係性を定式化したものである。リスク式の構築には、運転者が先行車の挙動からどんな視覚情報を通じて、どのように捉えているのかを明らかにする必要がある。すなわち、ひとつめの子課題 (RQ1) は、「先行車追従・接近場面の運転者の知覚する情報を特定し、その知覚特性を調べて、リスク式構築を行うこと」であり、第3章に記述した。本章 2.3 では、先行車追従・接近場面における視覚的な情報である2種類のオプティカルフロー (1/THW と 1/TTC) が支配的である可能性を示唆した。第3章では、この2種類のオプティカルフローが先行車の挙動の知覚を特定する指標であることを DS 実験から検証し、さらにその知覚特性を調べて、リスク式の構築を試みる。

知覚特性に基づくリスク式やリスク感を構成する2つのオプティカルフローの指標と運転行動との関係について理解を深めることで、リスク式の妥当性や有用性を確認することができる。そこで、ふたつめの子課題 (RQ2) は「知覚特性に基づいて定式化したリスク式が、運転行動にどのように反映されているかを調べること」であり、第4章に記述した。運転者のリスク感が表出する場面としてブレーキオンをしたタイミングや追従時の時間分布に着目し、DS 実験や実車公道実験から、リスク式を形成する 1/THW 項と 1/TTC 項の役割や式の形を検証した。知覚特性に関しては、個人間差が小さかったにも関わらず、ブレーキオンの運転行動では、個人間差がみられた。

第4章ではブレーキオンに関して個人間差がみられたため、提案したリスク式に対して個人適合する方法を検討する。リスク感を感覚量のひとつと想定すると、個人や状況ごとにその価値や意味は変わることが考えられる。そこで、みつつめの子課題 (RQ3) は、「リスク式をいかにして個人適合させるか？」であり、第5章に記述した。個人適合させる手法は、本章 2.6 で紹介した知覚-行為システムのアフォーダンス ( $\pi$  値研究) の考え方を参考にした。また、アフォーダンスは環境特性と個人特性 (運転者特性) によって定義されるが、この個人特性は、本章 2.5 で触れたように行動特性から個人特性を定義することが、より客観的かつ精度が向上すると考えたため、ブレーキ操作特性から個人特性を定義した。リスク式は、運転者のリスク感の尺度であるため、先行車追従・接近場面における、2つの異なるリスク度合と考えられるアクセルオフとブレーキオンの分離性能を DS 実験から検証した。

本章 2.7 で示したように DS 実験では、再現性の高い実験や基本的な特性を検証すること



## 第2章 運転行動における知覚と行為に関する知見

には適した実験ツールではあるが、一方で、再現できる走行環境や実験参加者の数などが限定的になる。そのため、DS 実験で検証した個人適応型リスク式の性能が、リアルワールドにおいて、妥当性と実現可能性の検証することが重要である。また、リスク式の構築という課題に対して、DS 実験による基盤的研究からリアルワールドにおける技術適用まで行うことは、有益であると思われる。そこで、4つめの子課題（RQ4）は、「個人適合したリスク式は、リアルワールドでどれだけ有効か？」であり、第6章に記述した。北米で計測されたナチュラルスティックな運転行動データ（NDD）を用いて、先行車追従・接近場面を抽出し、RQ3 と同様にアクセルオフとブレーキペダルの分離性能から、個人適応型リスク式の妥当性をリアルワールドデータで検証した。

第7章には総合考察、第8章には結論を記載した。

なお、著者論文目録、付録ならびに参考文献を巻末に掲載する。



図 2-11 論文の構成

### 3 先行車追従・接近場面における知覚特性とリスク式構築

#### 3.1 緒言

知覚-認知-判断-操作のプロセスは、運転行動の基礎的な知見として一般的に知られている。このプロセスの起点となる知覚特性を明らかにすることは、それ以降のプロセスである認知、判断、操作プロセスをより深く理解することが出来るであろう。本章では、先行車追従・接近時における Ecological Physics(Gibson, 1972/1982)を明らかにすべく、前述した2つのオプティカルフローの情報 ( $1/THW$  と  $1/TTC$ ) に着目し、物理量と運転者の主観的なリスク感について定式化を試みた。

先行車の接近・追従時には、大きく2つの場面に分類が可能である。図 3-1 に  $THW$ - $1/TTC$  位相平面上にその概念図を示す。本章 3.2 では、一定車間距離追従場面（図中赤枠、相対速度=ゼロ）における  $1/THW$  のリスク感の定式化を行う。また、本章 3.3, 3.4 では、接近場面（図中青枠、相対速度>ゼロ）の接近知覚の閾値、定式化を行う。本章 3.5 では、追従・接近場面におけるリスク感の定量化を試みる。本章 3.6 において、リスク式の考え方を定義し、本章 3.7 で2つの場면을統合したリスク式を構築する。

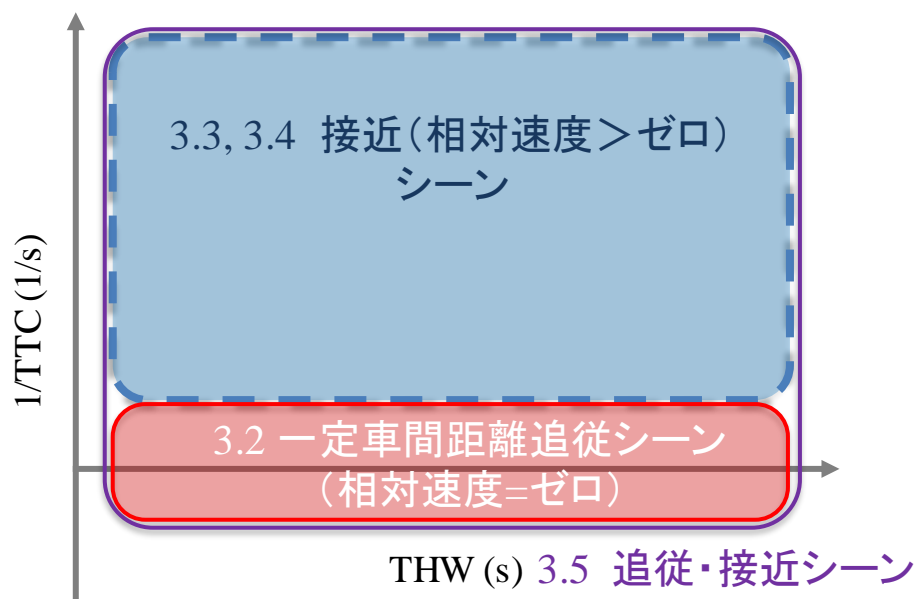


図 3-1 追従・接近場面の分類

## 3.2 先行車追従場面における知覚特性

### 3.2.1 概要

本節では、定常的な先行車追従場面における運転者の主観的なリスク感を定式化した。定常的な先行車追従場面とは、自車および先行車の同一の車速で走行し車速変化がなく、車間距離も変化しない場面である。マグニチュード推定法を用いて、追従場面を客観的に表現する指標と運転者の主観的なリスク感の関係をドライビングシミュレータ実験から明らかにした。本研究における追従場面の客観的な指標は、先行車追従場面におけるオプティカルフローとして支配的なパラメータと考えられる  $1/THW$  を用いた。その結果、 $1/THW$  が先行車追従場面において支配的なパラメータであることがわかり、本運転場面におけるリスク式はこの  $1/THW$  で表現可能なことがわかった。

### 3.2.2 固定式ドライビングシミュレータ

運転者のリスク感を定量化する実験参加者実験にあたり、実験条件を安定的に発生させることが可能な固定式ドライビングシミュレータ (FDS) (図 3-2) を用いた。本装置は、広画角 (水平  $0.70 \text{ rad}(40 \text{ deg}) \times$  垂直  $0.52 \text{ rad}(30 \text{ deg}) \times 3$  スクリーン) を有し、解像度は、 $8.7 \times 10^{-4} \text{ rad/pixel}$  ( $3.0 \text{ arcmin/pixel}$ ) である。運転中の入力情報の大半は視覚入力であり、今回はこの視覚入力に起因するリスク感のみに注目するため、走行中の走行音・振動等の刺激は与えていない。

実験風景を図 3-3 実験風景に示す。



図 3-2 固定式ドライビングシミュレータ



図 3-3 実験風景

3.2.3 マグニチュード推定法

実験は、マグニチュード推定法（ME法：Magnitude Estimation method）（Stevens, 1957）による一対比較を行い、実験参加者にリスク感を見積もらせた。ME法は、人間の知覚した感覚の大きさを直接的に表現させ、刺激強度に対する人間の知覚の関係を定式化する方法である。ME法によって得られた実験結果から、スティーブンスの冪関数法則（Stevens' power law）により、人間の知覚した感覚の大きさは定式化が可能である。人間が見積もられた感覚の大きさ  $S$  と刺激強度  $I$  との関係は、式（3.1）のように近似できる。

$$S = kI^n \quad 3-1$$

$k$ : 定数,  $n$ : 感覚ごとに定まる冪指数

図 3-4 に ME 法で得られた冪関数の特性を示す。冪指数  $n$  が 1 未満の人間が感じられる刺激は図中の「明るさ」のような特性を持ち、一方で  $n$  が 1 より大きいものは、電気刺激のような特性を持つ。

ME法とスティーブンスの冪関数法則を用いて、定量化されたヒトの感覚量は、表 3-1 のようなものがある。本節の 3.2 では、先行車に一定の車間距離（相対速度がゼロ）で追従運転している場合のリスク感を、ME法を用いて、冪指数を算出する。また、本章 3.4 では、先行車が一定の相対速度、もしくは一定の相対減速度で自車に接近した場合のリスク感の冪指数を実験的に算出する。

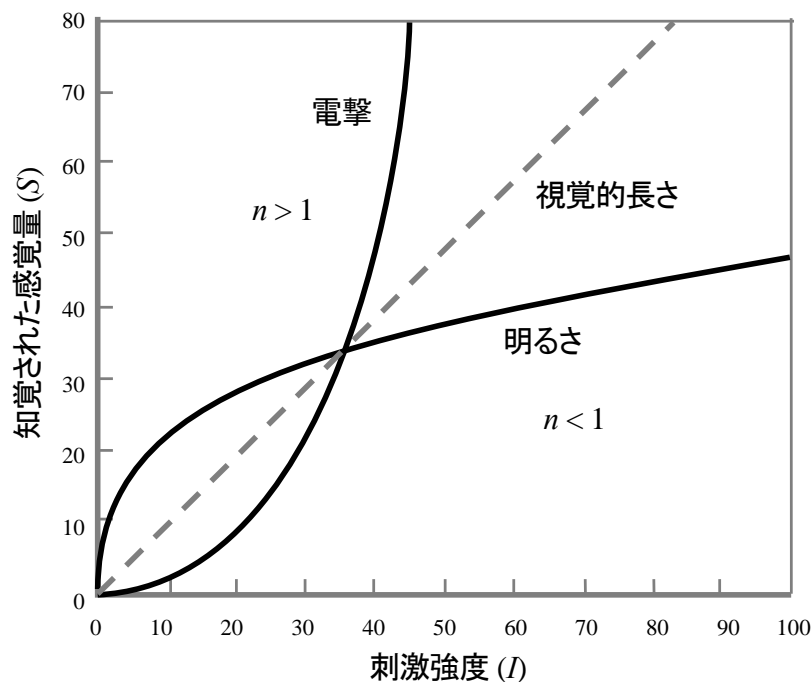


図 3-4 刺激強度と知覚された感覚量の関係（参考文献(松田, 1995)から作図）

表 3-1 実験的に求められた冪指数(参考文献(Stevens, 1961)より抜粋して作成)

連続する知覚刺激	冪指数	実験条件
音の大きさ	0.6	両耳
音の大きさ	0.54	片耳
明るさ	0.33	5度のターゲット, 暗順応
におい	0.55	コーヒーの香り
味覚	0.8	サッカリン(甘さ)
味覚	1.3	しょ糖(甘さ)
味覚	1.3	塩
温度	1.0	腕における冷感
温度	1.6	腕における温感
振動	0.95	60 サイクル/秒, 指への振動
振動	0.6	250 サイクル/秒, 指への振動
重さ	1.45	おもりの持ち上げ
指間の距離	1.3	木のブロックの厚さ
電撃	3.5	指に対する 60 サイクル/秒

### 3.2.4 実験手順

実験は、前述の ME 法を用いて、一定の車間（相対速度がゼロ）で追従している場合の先行車に対するリスク感を定量化した。ME 法は、一対比較法であり、標準刺激に対する比較刺激の大きさを実験参加者に見積もらせる方法である。具体的には、以下の手順を繰り返して行った。また、手順の概念図を図 3-5 に示す。

- 1) 標準刺激の追従場面で、所定時間（10 秒）、追従運転させる
- 2) 2 秒間、先行車が消える（ブランク画面）
- 3) 次に比較刺激の追従場面で 1)同様に追従運転させる
- 4) 1)の標準刺激と比べ、3)の比較刺激のリスク感が何倍に感じるかを実験参加者に口頭で報告してもらう。

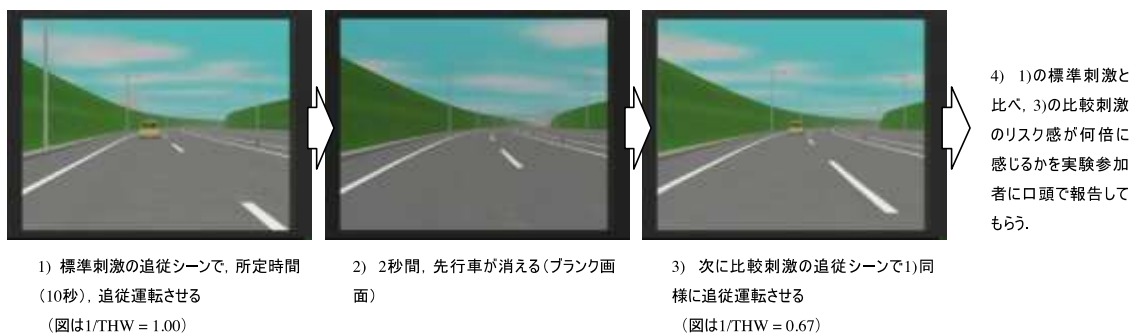


図 3-5 マグニチュード推定法の実験手順

実験条件は、表 3-2 に示す組み合わせで一対比較を行った。実験指標となる 1/THW は、車間距離と追従速度の組み合わせである。1/THW における車間距離の影響、追従速度の影響をそれぞれ調べるため、車間距離を変化させた場合の実験と、追従速度を変化させた場合の2種類の実験を実施した。実験参加者数は、実験 1,2 いずれも 10 名とした。本実験に参加するにあたり、実験の説明を受けたのち、実験参加への同意を得ている。実験計画は、倫理的な配慮<sup>6</sup>をしている。

表 3-2 ME 法による 1/THW の実験

		比較刺激									
		1/THW	0.29	0.33	0.40	0.50	0.67	0.80	1.00	1.33	2.00
標準刺激	1/THW	THW	3.50	3.00	2.50	2.00	1.50	1.25	1.00	0.75	0.50
	0.29	3.50		X	X	X					
	0.33	3.00	X		X	X					
	0.40	2.50	X	X		X	X				
	0.50	2.00	X	X	X		X	X			
	0.67	1.50			X	X		X	X		
	0.80	1.25				X	X		X	X	
	1.00	1.00					X	X		X	X
	1.33	0.75						X	X		X
	2.00	0.50							X	X	

<sup>6</sup> 実験参加者への倫理的な考慮として、以下の項目が実験計画に盛り込まれ、実験を実施した

- ・ 実験開始後も、実験参加者の意思で自由に実験を中止することができる
- ・ 実験時間は2時間以内とし、実験参加者の意思で任意に休憩を取れる
- ・ シミュレータ実験においては、実験事前の練習、過去の経験により、シミュレータ酔いが発生しないことを確認している
- ・ 実験参加者のプライバシーは守られるように、実験・分析が行われている

① 車間距離を変化させた場合の一対比較実験

表 3-3 に車間距離を変化させた場合の一対比較実験の実験パラメータを示す。表中の“dist”は車間距離 (m) を示す。実験は、追従速度 28 m/s (100 km/h) で走行し、標準刺激の車間距離と比較刺激の車間距離のリスク感を評価した。例えば、 $1/THW = 1$  と  $1/THW = 0.67$  を比較する場合は、同じ追従速度 28 m/s (100 km/h) で走行し、車間距離だけを変えて 28 m と 42 m のリスク感を比較する。図 3-6 にこの条件時の呈示される車間距離の違いを示す。

表 3-3 ME 法による  $1/THW$  の実験(車間距離を変化させた場合, 車速 28m/s(100km/h)固定)

		比較刺激									
		1/THW	0.29	0.33	0.40	0.50	0.67	0.80	1.00	1.33	2.00
標準刺激	1/THW	Dist(m)	97.2	83.3	69.4	55.6	41.7	34.7	27.8	20.8	13.9
	0.29	97.2		X	X	X					
	0.33	83.3	X		X	X					
	0.40	69.4	X	X		X	X				
	0.50	55.6	X	X	X		X	X			
	0.67	41.7			X	X		X	X		
	0.80	34.7				X	X		X	X	
	1.00	27.8					X	X		X	X
	1.33	20.8						X	X		X
	2.00	13.9							X	X	





(a)  $1/THW = 1.0$  (1/s)時の呈示画面



(b)  $1/THW = 0.67$  (1/s)時の呈示画面

図 3-6 車間距離を変化させた場合の  $1/THW$  による先行車の接近度合の違い

② 追従速度を変化させた場合の一対比較実験

表 3-4 に追従速度を変化させた場合の一対比較実験の実験パラメータを示す。表中の“V”は追従速度 (m/s) を示す。実験は、車間距離 20 m で追従走行し、標準刺激の追従車速と比較刺激の追従車速のリスク感を評価した。例えば、 $1/THW=1$  と  $1/THW=0.5$  を比較する場合は、同じ車間距離 20 m で走行し、追従速度だけを変えて 10 m/s (36 km/h) と 20 m/s (72 km/h) のリスク感を比較する。

表 3-4 ME 法による  $1/THW$  の実験(追従速度を変化させた場合, 車間距離 20m 固定)

		比較刺激									
		1/THW	0.29	0.33	0.40	0.50	0.67	0.80	1.00	1.33	2.00
標準刺激	1/THW	V(m/s)	5.7	6.7	8.0	10.0	13.3	16.0	20.0	26.7	40.0
	0.29	5.7		X	X	X					
	0.33	6.7	X		X	X					
	0.40	8.0	X	X		X	X				
	0.50	10.0	X	X	X		X	X			
	0.67	13.3			X	X		X	X		
	0.80	16.0				X	X		X	X	
	1.00	20.0					X	X		X	X
	1.33	26.7						X	X		X
	2.00	40.0							X	X	

## 3.2.5 実験結果および考察

車間距離，相対速度を変化させた場合，それぞれ実験参加者が見積もったリスク感を，ギューリクセンの方法(Gulliksen, 1956)を用いて解析を行った．なお，ギューリクセンの方法は，不完備である一対比較の結果（表 3-2 に示すような全ての条件の組み合わせがない場合）に心理尺度を構成する方法である．

図 3-7 に全ての実験参加者の平均値と近似曲線，相関係数を示す．図中のプロットは，横軸  $1/THW$  に対する，上記の方法から導かれた運転者のリスク感を示す．なお，実験における最も小さい刺激 ( $1/THW=0.29$ ) は，リスク感を定式化した際の基準概算値 1 付近を示す．これより，車間距離，追従速度のいずれを変化させた場合も  $1/THW$  が大きいほど，運転者のリスク感が大きいことが示されている．この結果は，同じ追従速度の場合，車間距離が短いほどリスク感は大きくなり，また同じ車間距離では追従速度が高いほどリスク感が大きいことを示す．また，両者の近似曲線は，いずれもおよそ 1 の冪指数である．つまり，車間距離，追従速度を変化させた場合でもリスク感  $RF$  は  $1/THW$  に比例することが分かった．

今回，実験を行った車速の範囲 (5.7-40.0 m/s, 20.5-144.0 km/h) および，車間距離の範囲 (13.9-97.2km/h) において，一定速追従場面における運転者のリスク感 (Risk Feeling) は， $1/THW$  をパラメータとして，以下，式 (3-2) のように

$$RF_{steady} = \frac{1}{THW} \quad 3-2$$

定式化できることが分かった．

従来までの車間距離の知覚実験においては，走行中の車間距離は過小評価される結果であった(Rockwell, 1972)．本実験は，今回の実験条件の範囲において， $1/THW$  に依存した結果が得られた．これは，2つの理由が考えられる．ひとつは，停止時（観察者が止まっている場合）の距離知覚は正確にできるもの，走行時（観察者が移動している場合）の距離知覚では距離を正確に見積もることは困難であり， $1/THW$  を手がかりにしている可能性があること．ふたつめは，前述の距離知覚の実験は絶対評価で行っていたため，本実験の相対比較と比べて，見積もり精度にばらつきが生じやすかったことが考えられる．

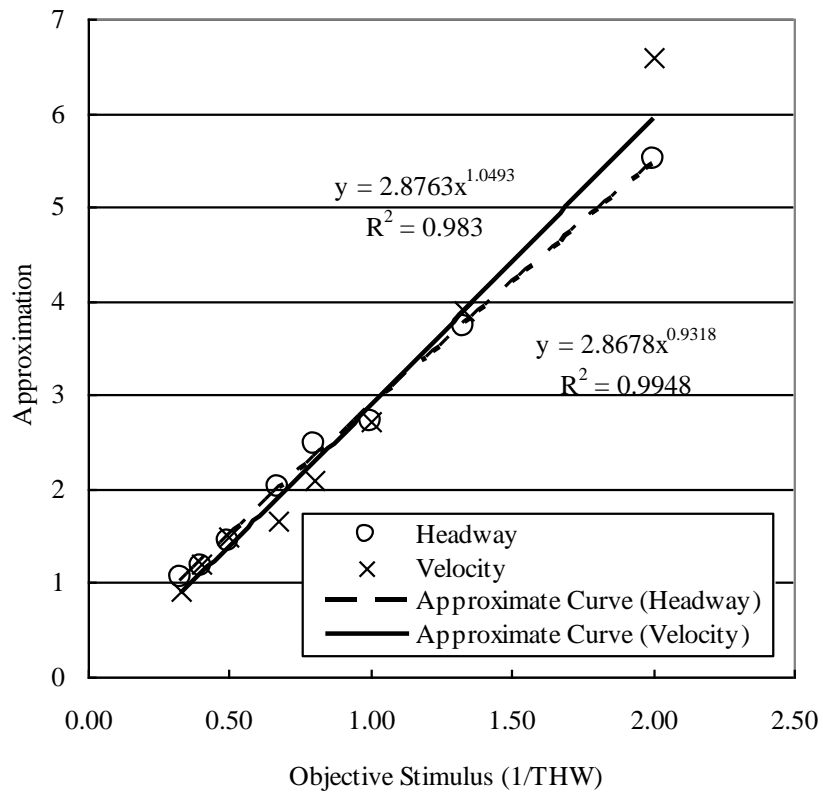


図 3-7 1/THW の主観評価と客観的評価の関係

### 3.2.6 まとめ

先行車追従場面における先行車に対する主観的リスク感の定量化を行った結果、実用環境における先行車追従場面において、先行車に対する主観的なリスク感は、1/THW で定式化ができることがわかった。

### 3.3 先行車接近場面における先行車知覚特性 1: 閾値

#### 3.3.1 概要

本節では、先行車接近場面における先行車の減速開始時の知覚特性を明らかにした。ドライビングシミュレータを用いて先行車減速開始直後に、運転者が先行車の接近を知覚したタイミングを調べた。

結果、先行車減速開始の運転者の接近知覚のタイミングは、先行車の初期車間距離に依存せず、 $1/TTC$  が一定になることがわかった。

#### 3.3.2 動揺式ドライビングシミュレータ

図 3-8 に、実験に用いた動揺式ドライビングシミュレータ (MDS) を示す。DS は、本実験における実験条件を安全に再現可能である。この DS は、3 面のスクリーンで広い視野角 (垂直方向  $0.79 \text{ rad}$  ( $45 \text{ deg}$ ) , 水平方向  $0.52 \text{ rad}$  ( $30 \text{ deg.}$ )) を持ち、解像度は  $2.9 \times 10^4 \text{ rad/pixel}$  ( $1.0 \text{ arcmin/pixel}$ ) である。動揺呈示装置は、ピッチ方向、ロール方向に対して自由度を持つ。



図 3-8 動揺式ドライビングシミュレータ

### 3.3.3 実験方法

22歳から54歳までの男性8名 ( $m=26.0, SD=11.0$ ) が実験に参加した。全ての実験参加者は、運転に必要な視力（メガネなど着用も含める）と普通運転免許を所有し、また、少なくとも週に3回以上運転している。また、実験に参加するにあたり、実験の説明を受けたのち、実験参加への同意を書面で得ている。実験計画は、倫理的な配慮（脚注6, 33ページ）をしている。

実験参加者には、MDSで、高速道路を模擬した道路に追従運転をしてもらった。実験条件を表3-5に示す。走行速度は27.8 m/s (100 km/h) 一定であり、先行車との初期車間距離は20 mから60 mの4条件、先行車の初期速度は27.8 m/s (100 km/h) であり、先行車の減速度は1 m/s<sup>2</sup>から9 m/s<sup>2</sup>まで9条件設定した。

実験参加者には、「ブレーキペダルの上に右足を乗せておき、先行車の接近を知覚したら速やかにブレーキペダルを踏む」ように教示した。この方法で、先行車接近時の知覚のタイミングとブレーキペダルを踏むまでのタイミングが安定的に計測できるものと考えられる。実験参加者は、DSの運転に慣れるため、実験前に練習走行を行った。実験では、運転者がブレーキペダルを踏むまで車速のコントロールは、DSのホストコンピュータによって制御された。

表 3-5 先行車接近の知覚実験のパラメータ

自車速度 (m/s)	27.8
初期車間距離 (m)	20, 30, 40, 60
先行車初期速度 (m/s)	27.8
先行車減速度 (m/s <sup>2</sup> )	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9

### 3.3.4 分析方法

ブレーキ操作のタイミングのばらつきは、先行車の接近条件の影響を受けやすい。これは、ブレーキ操作の判断後の空走時間が一因と考えられる。図2-7と図2-8に示すように先行車に接近時の1/TTCの特性は、車間距離が短くなるほど、また、相対速度が大きくなるほど、単位時間あたりの1/TTC増加量が大きくなる。つまり、同じ空走時間でも1/TTCの増加量は、接近度合（相対速度または先行車減速度）に応じて異なる。本研究では、先行車接近を知覚したタイミングをできるだけ正確に測定したい。空走時間（知覚してからペダルが踏まれるまでの時間）の影響を最小限に止めるために、ブレーキ操作のタイミングから単純反応時間を差し引くことにより、先行車接近を知覚したタイミングを推定した。このよ

うな反応時間を差し引く手法は, Torf et al. (1966)の研究でも行われている. 単純反応時間は, 別の実験において, 計測した<sup>7</sup>. 図 3-9 と表 3-6 に実験参加者ごとのブレーキの単純反応時間を示す. 各実験参加者の平均の単純反応時間は, 0.40~0.49 秒 (平均 0.44 秒) であった. 図 3-10 に単純反応時間を差し引くプロセスの概念図を示す. 図は, 追従 (相対速度=ゼロ) から先行車が接近開始後の  $1/TTC$  の変化を示す. この図 3-10 を用いて, ブレーキ操作の判断タイミングの算出プロセスを以下に示す.

- i) 先行車の減速開始時の知覚した判断したタイミングを, ブレーキペダルを用いて計測する
- ii) 別の実験でブレーキを踏む動作の単純反応時間を計測し, 実験参加者ごとに平均値を算出する.
- iii) i)で得られた各試行のブレーキペダルの踏んだタイミングから, ii)で得られた実験参加者ごとの単純反応時間の平均値を, 差し引く, すなわち, 実際に知覚したと推定される時間が算出される.
- iv) 知覚推定時間における,  $1/THW$  や  $1/TTC$  を時系列データから算出する.

以上の手続きにより, 実験参加者が先行車の減速を実際に知覚したタイミングを推定することにより, そのタイミングの走行状況を安定的に観察することが可能になる.

---

<sup>7</sup> 実験参加者に, 先行車のブレーキライトが点灯後, 点灯知覚したらすぐにブレーキペダルを踏むように教示した. 実験参加者ごとに, 視覚刺激に対する単純反応時間の平均値 (試行回数10回分) を計測した.

---

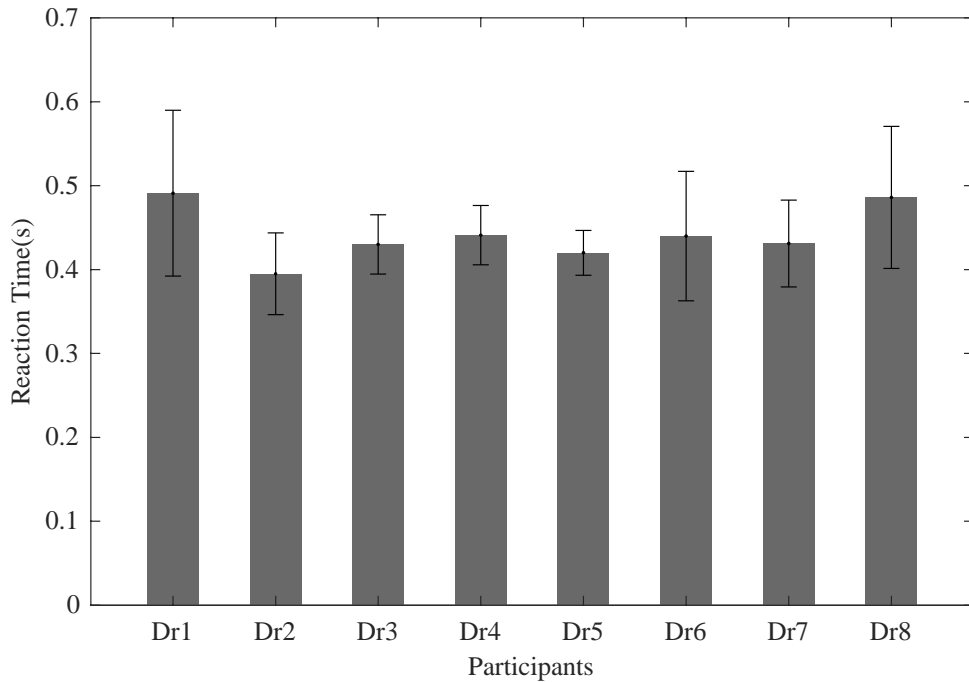


図 3-9 実験参加者ごとの単純反応時間

表 3-6 実験参加者ごとの単純反応時間

	Dr.1	Dr.2	Dr.3	Dr.4	Dr.5	Dr.6	Dr.7	Dr.8
平均値 (s)	0.49	0.47	0.40	0.43	0.44	0.42	0.44	0.43
標準偏差 (s)	0.10	0.04	0.05	0.04	0.04	0.03	0.08	0.05

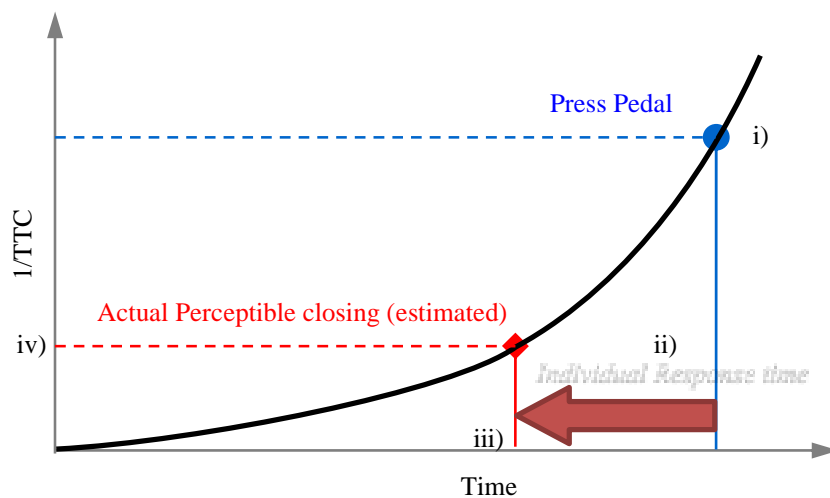


図 3-10 先行車の接近を知覚したタイミングの推定方法の概念図



### 3.3.5 実験結果および考察

図 3-11 に、先行車が初期車間距離から減速し、実験参加者が先行車の減速を知覚しブレーキを踏んだ際の  $1/TTC$  について、初期車間距離ごとに各実験参加者の平均値を示す。この図では、実験参加者の反応時間を含んでいる。この図において、初期車間距離が短いほど、 $1/TTC$  が大きくなることが示されている。

図 3-12 に、先行車が初期車間距離から減速し、実験参加者が先行車の減速を知覚した推定タイミングの  $1/TTC$  について、初期車間距離ごとに各実験参加者の平均値を示す。この推定結果は、図 3-11 に用いた同じデータを用いている。ただし、各実験参加者が知覚したと推定したタイミングにおける  $1/TTC$  (単純反応時間を差し引いた  $1/TTC$ ) である。この図では、減速を知覚した推定タイミングの  $1/TTC$  の大きさは、初期車間時間によらず、ほぼ一定であることが示されている。実験参加者間 (個人間差) の影響は、標準偏差を参考にすると大きくない。図 3-13 に、先行車が初期車間距離からの減速を知覚した際の  $1/TTC$  の全実験参加者の平均を示す。この図では、初期車間距離によらず  $1/TTC$  は一定であることが示されている。また、分散分析の結果、初期車間時間に対して有意な差は見られなかった。

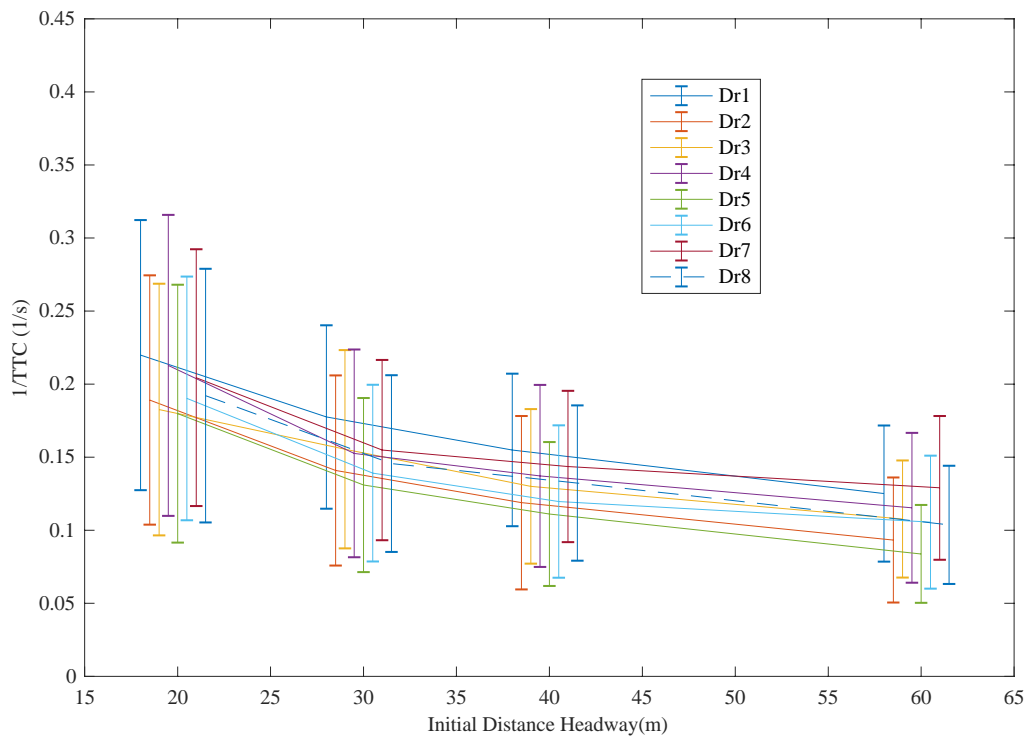


図 3-11 先行車接近を知覚後のブレーキ操作時の  $1/TTC$  と初期車間距離の関係（実験参加者ごとの平均値）

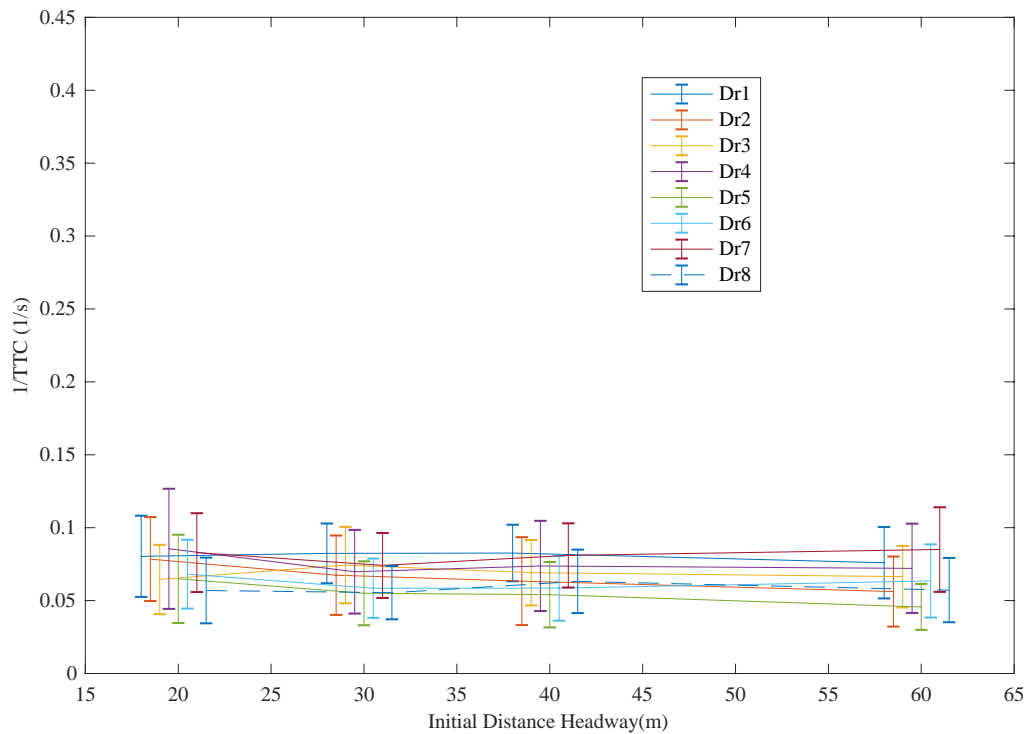


図 3-12 先行車接近時の知覚時間を推定した  $1/TTC$  と初期車間距離の関係（実験参加者ごとの平均値）

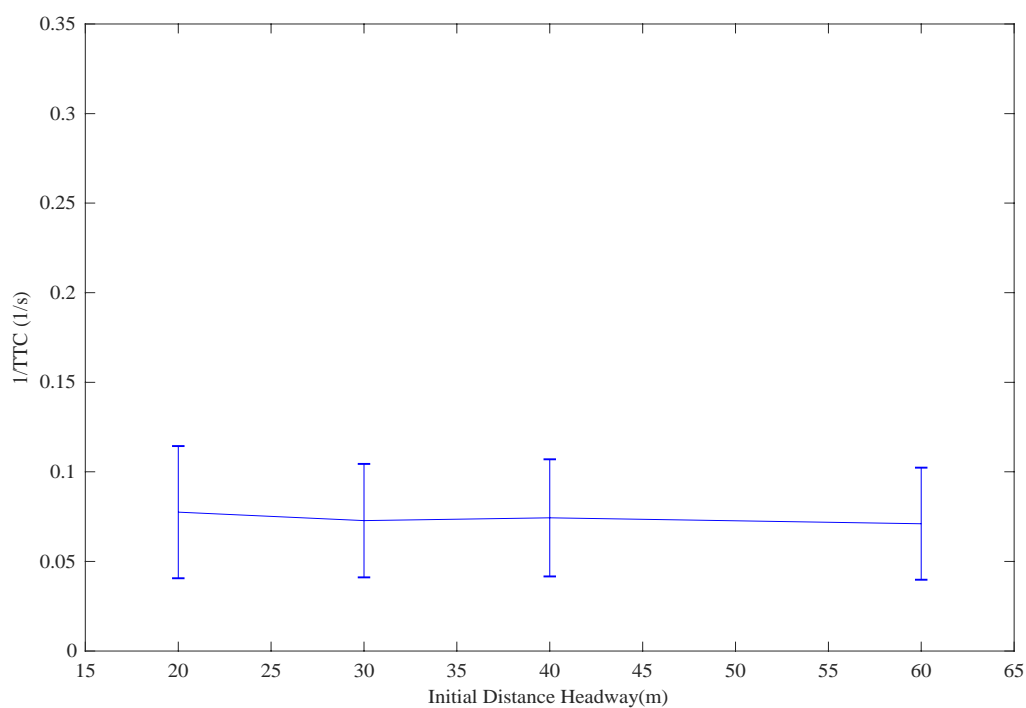


図 3-13 先行車接近時の知覚時間を推定した  $1/TTC$  と初期車間距離の関係（実験参加者の平均値）

### 3.3.6 まとめ

先行車接近場面における先行車の知覚特性である、先行車の接近知覚の閾値を DS 実験から調べた結果、先行車の接近知覚の閾値は、 $1/TTC$  に依存することがわかった。また、この接近知覚の閾値に関して、実験参加者間による差は大きくなかった。

## 3.4 先行車接近場面における先行車知覚特性 2: 接近知覚量の定量化

### 3.4.1 概要

前節(3.3)の結果から、先行車接近知覚の閾値は、 $1/TTC$  に依存していることが分かった。本節は、先行車の接近度合の知覚も同様に  $1/TTC$  を手がかりに知覚していることを、先行車の接近に対する運転者の主観的な評価と  $1/TTC$  の刺激強度の関係性から、DS 実験で検証した。結果、先行車の接近度合の知覚は、「相対速度で接近する条件」および「先行車が一定の減速で接近する条件」とともに、 $1/TTC$  で定式化ができることがわかった。

### 3.4.2 簡易型ドライビングシミュレータ

図 3-14 に本実験に用いた簡易型ドライビングシミュレータの概念図を示す。本シミュレータは、画像呈示用ディスプレイ、ステアリングホイール、アクセルペダルとブレーキペダルを有している。ディスプレイのサイズは、水平方向  $0.20\text{ rad}$  ( $11.4\text{ deg}$ )、垂直方向  $0.15\text{ rad}$  ( $8.5\text{ deg}$ ) であり、実験目的を満たした解像度 ( $1.2 \times 10^{-4}\text{ rad/pixel}$  ( $0.4\text{ arcmin/pixel}$ )) を有する。本実験で実験参加者は、高速道路上の車両(車幅  $1.7\text{ m}$ )の接近度合を知覚し、接近度合を口頭で報告する。この DS は、先行車との車間距離、相対速度、先行車の減速度が任意に変更できる。また、図 3-14 に示すように、実走行環境と同等になるようにアイポイントの高さは  $1.2\text{ m}$  とした。図に画面に表示される画像の一例を示す。直線区間の高速道路上でガードレールなど配置し、外乱の少ない走行環境とした。先行車の表示される大きさは、実際の運転状況と同等になるようにディスプレイまでの視距離が確保され、実験参加者のアイポイントとディスプレイの中心までの距離は  $1.0\text{ m}$  とした。

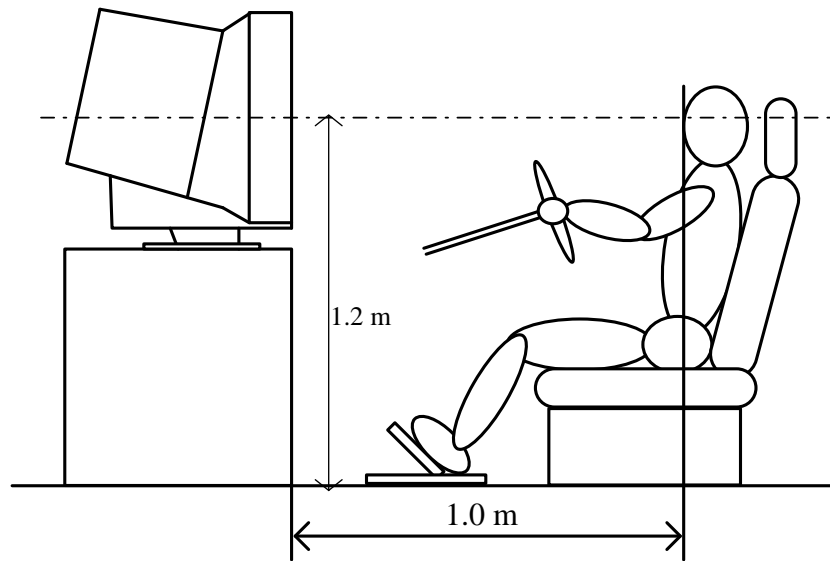


図 3-14 簡易型ドライビングシミュレータの概念図



図 3-15 接近度合実験用シミュレータの前方画面

### 3.4.3 実験方法

9名の実験参加者が実験に参加した。全実験参加者は、運転に必要な視力（矯正も含む）を有している。実験参加者の平均年齢は22.7歳（SD = 0.87, 22-25歳）である。実験参加者は、実験に関する説明を受けた上で、実験への参加の意思を確認した。実験計画は、倫理的な配慮（脚注6, 33ページ）をしている。

本実験では、先行車の接近度合の知覚量を、マグニチュード推定法（ME法）より定式化するため、以下2つの接近条件を調査する。

- 1) 相対速度条件：一定相対速度で接近する先行車に対する運転者の主観的な相対速度の評価と実際の相対速度の関係を明らかにする実験
- 2) 先行車減速条件：一定の減速度で減速し接近する先行車に対する運転者の主観的な先行車減速度の評価と実際の先行車の減速度の関係を明らかにする実験

表3-7、表3-8に一定相対速度条件、減速度条件における実験条件をそれぞれ示す。

相対速度条件は相対速度5.6 m/s (20 km/h) から27.8 m/s (100 km/h) の範囲で5水準、また接近開始の車間距離は40 m から200 m で5水準とした。また、先行車減速条件は、 $1 \text{ m/s}^2$  から  $9 \text{ m/s}^2$  の範囲で5水準、減速開始時の車間距離は40 m から200 m で5水準とした。両条件で自車、および、先行車の初期車速は、27.8 m/s (100 km/h) 一定とした。実験参加者は、高速道路のほぼ直線部分を走行した。実験参加者は、27.8 m/s で走行する先行車を追従し、その後、先行車の接近開始を知覚する。実験参加者のタスクは、標準刺激と比較刺激の接近度合を比較することである。相対速度条件の標準刺激は16.7 m/s (表3-7におけるアスタリスク) とし、先行車減速条件の標準刺激は  $5 \text{ m/s}^2$  (表3-8におけるアスタリスク) とした。実験参加者は、最初に標準刺激を呈示させられ、この刺激を1とする。続いて比較刺激を呈示され、標準刺激に対する比較刺激の先行車の接近度合は何倍であったかを見積もらせた。例えば、先行車減速条件で標準刺激  $5 \text{ m/s}^2$  に対して比較刺激  $7 \text{ m/s}^2$  の大きさを見積もったとする。このときに実験参加者は、例えば、標準刺激の1に対して、比較刺激は、1.3倍の大きさというように見積もりをする。この手順を繰り返し、定量化を行った。なお、それぞれの比較条件で3回ずつ実験を行った。

表 3-7 先行車一定相対速度接近の実験条件

初期追従速度 (m/s)	27.8
初期車間距離 (m)	40, 80, 120, 160, 200
相対速度 (m/s)	5.6, 11.1, 16.7*, 22.2, 27.8

\*は実験における標準刺激を示す

表 3-8 先行車減速度接近の実験条件

初期追従速度 (m/s)	27.8
初期車間距離 (m)	40, 80, 120, 160, 200
先行車の減速度 (m/s <sup>2</sup> )	1, 3, 5*, 7, 9

\*は実験における標準刺激を示す

#### 3.4.4 解析方法

相対速度または先行車の減速度に対する運転者の主観的評価と、客観的な接近度合の関係性を、スティーブンスの冪関数法則より定式化した。客観的な接近度合は、運転者の刺激の入力となっていると考えられる視覚刺激の強度を2つのアプローチで定義した。ひとつめの方法は、相対速度の大きさ、もしくは、先行車の減速度の大きさを、比較刺激を標準刺激で除算して、ME法の刺激強度を算出する方法である。例えば、一定相対速度条件において標準刺激 16.7 m/s に対する比較刺激 11.1 m/s の刺激強度は、0.67 (=11.1/16.7) である。また、先行車減速条件において標準刺激 5m/s<sup>2</sup> に対する比較刺激 9m/s<sup>2</sup> の刺激強度は、1.8 (=9/5) である。2つめの方法は、ヒトの視覚入力と考えられる 1/TTC の大きさを、刺激強度を定義する方法である。視角変化 (1/TTC) の観点から客観的な刺激強度は、付録の式 (A-4)、または、式 (A-9) で計算される。例えば、この方法では、一定相対速度条件において標準刺激 16.7 m/s に対する比較刺激 11.1 m/s の刺激強度は、0.67 である (付録の式 (A-4) 参照)。また、先行車減速条件において標準刺激 5 m/s<sup>2</sup> に対する比較刺激 9 m/s<sup>2</sup> の刺激強度は、1.3 (=9/5)<sup>0.5</sup> である (付録の式 A-9 式参照)。

#### 3.4.5 実験結果

表 3-9 に、一定相対速度条件と先行車減速条件における近似曲線の冪指数を初期車間距離ごとに示す。この近似曲線の冪指数は、刺激強度と主観的な見積もりの関係を、最小自乗法を用いて算出してのものである。一定相対速度条件の冪指数は、0.93 から 1.03 の範囲であり、またこの相関係数は、0.91 から 0.97 である。また、先行車減速条件の冪指数は、0.53 から 0.61 の範囲であり、また、この相関係数は、0.94 から 0.96 である。

図 3-16 に、主観的な接近評価値と接近条件の比率で定義した刺激強度の関係を示す。この図は、一定相対速度条件（図中○）と先行車減速条件（図中赤 X）の結果を示す。表 3-9 では、初期車間距離ごとに刺激強度と標準刺激の特性を示したが、本図では、全ての車間距離の平均値を示す。一定相対速度条件の近似曲線は青線、先行車減速条件の近似曲線は赤線でそれぞれ示す。一定相対速度条件時の各条件の平均の冪指数は 0.98 であり、先行車減速条件の冪指数は、0.57 であった。

表 3-10 に、表 3-9 の刺激強度を視覚刺激である 1/TTC で定義した場合の、一定相対速度条件と先行車減速条件における近似曲線の冪指数を初期車間距離ごとに示す。この一定相対速度条件における近似曲線の冪指数（図中青線）は、表 3-9 の結果と同一である。なぜなら、これは、実験条件（相対速度（m/s））で定義した刺激強度と、視角変化（1/TTC（1/s））で定義した刺激強度が同じになるためである。一方で、先行車減速条件の冪指数は、1.05 から 1.22 の範囲であり、おおよそ 1 である。これは、すなわち、視角変化で定義した刺激強度にした場合に、先行車接近に対する運転者の主観的な接近感と刺激強度の関係は、一定相対速度条件、先行車減速条件ともにほぼ比例関係にある。

図 3-17 に、主観的な接近評価値と 1/TTC で定義した接近条件の比率で定義した刺激強度の関係を示す。この図における刺激強度、および、主観的な接近度合は、図 3-16 同様、標準刺激に対する比較刺激の相対評価を行ったものである。この図 3-17 は、図 3-16 と刺激強度の定義以外同じである。図より、一定相対速度条件の冪指数は 0.98、先行車減速条件の冪指数は 1.13、両者の近似曲線はほぼ線形である。

理論的には、刺激強度を相対速度のパラメータと先行車減速パラメータとして定義すると、冪指数はそれぞれ 1.0 と 0.5 である。一方で、刺激強度をヒトの入力刺激として考えられる視覚刺激 1/TTC（原理は付録を参照）とすると両者の冪指数が 1 になる。本結果は、理論的な予測とよりよく合致した結果であるといえる。以上の結果は、運転者は先行車の接近を視角変化から知覚をしており、また、同時にヒトの知覚量と 1/TTC の関係性に強い結びつきがあることが考えられる。

今回、実験を行った実験条件の範囲において、先行車接近場面における運転者のリスク感（Risk Feeling）は、1/TTC をパラメータにして、

$$RF_{transient} = \frac{1}{TTC} \quad 3-3$$

で定式化できることが分かった。



表 3-9 接近度合で定義した刺激強度と主観的な評価値の近似曲線の冪指数と相関係数

Initial Distance Headway	Intensity in Term of Closeness (velocity and deceleration)			
	Relative Velocity Conditions		Deceleration Conditions	
	Power Exponents	Correlation	Power Exponents	Correlation
40 m	0.96	0.91	0.54	0.96
80 m	0.93	0.93	0.53	0.96
120 m	0.96	0.94	0.61	0.96
160 m	1.03	0.97	0.55	0.95
200 m	1.01	0.94	0.61	0.94
Overall	0.98	0.93	0.57	0.95

表 3-10 1/TTC で定義した刺激強度と主観的な評価値の近似曲線の冪指数と相関係数

Initial Distance Headway	Intensity in Term of 1/TTC (Change in Visual Angles)			
	Relative Velocity Conditions		Deceleration Conditions	
	Power Exponents	Correlation	Power Exponents	Correlation
40 m	0.96	0.91	1.07	0.96
80 m	0.93	0.93	1.05	0.96
120 m	0.96	0.94	1.21	0.96
160 m	1.03	0.97	1.10	0.95
200 m	1.01	0.94	1.22	0.94
Overall	0.98	0.93	1.13	0.95

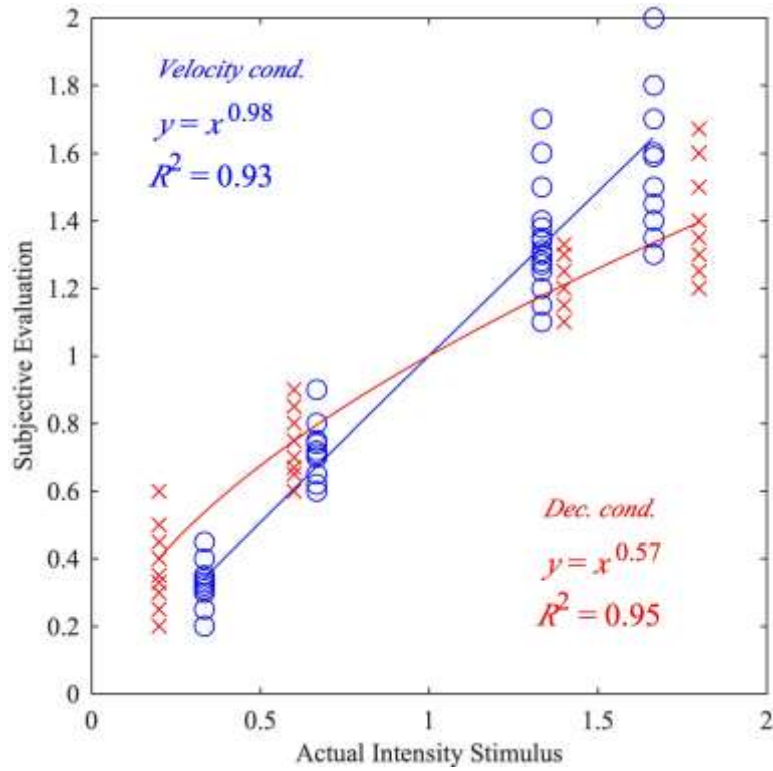


図 3-16 主観的な接近評価値と接近条件の比率で定義した刺激強度の関係

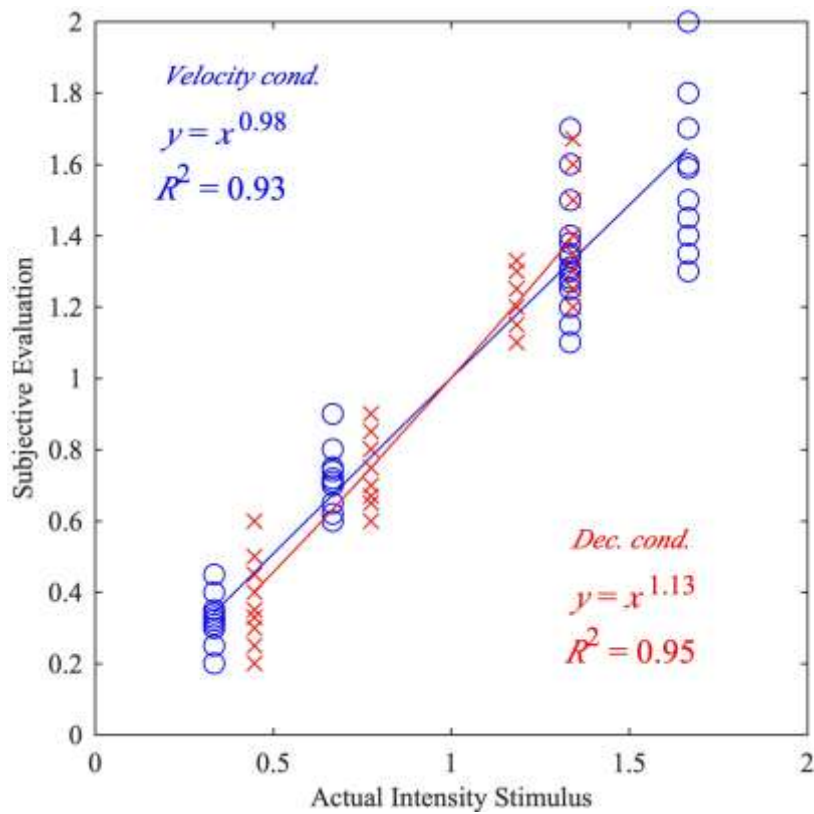


図 3-17 主観的な接近評価値と接近の 1/TTC で定義した刺激強度の関係

### 3.4.6 考察

本節 3.4 では、先行車の接近度合の知覚に関して、運転者が見積もるリスク感の大きさと刺激強度の関係を明らかにするため、2つの接近条件を設定した。接近条件として 1) 相対速度で接近する場合と 2) 先行車が一定の減速度で接近する場合について、マグニチュード推定法を用いて運転者が見積もる接近度合の知覚量を実験的に定式化した。接近度合の刺激強度の指標として、相対速度や先行車の減速度の大きさの比にした場合、1) の冪指数は 1、2) の冪指数は 0.5 になることがわかった。一方で、接近度合の刺激強度の指標として、1) 2) の条件をそれぞれ、ヒトの視覚入力である  $1/TTC$  (視角変化) の比にした場合、1)、2) の冪指数はともに 1 になることがわかった。これは、相対速度条件は刺激強度の定義で冪指数により変わらないが、先行車減速条件は刺激強度の定義により冪指数が変わる。先行車減速条件の 0.5 乗の冪指数の関係を持つことは、付録に示すように  $1/TTC$  として刺激強度を算出すると相対減速度に換算すると 0.5 乗の冪指数を持つことに起因すると考えられる。

従来の研究と今回の結果について、以下に考察する。 $1/TTC$  の知覚特性に関する様々な研究が、過去に様々行われてきた。以降、本研究の結果との差異や考察を記述する。

#### 1) $1/TTC$ および $TTC$ の加速度成分の取り扱い

$1/TTC$  または  $TTC$  は、加減速度を有する場合、どのように知覚しているか、また実際に衝突する時間までの誤差の解消方法について、議論されてきた(Benguigui, Ripoll & Broderick, 2003; Horst, 1990; Lee et al., 1983)。加速度を考慮した  $TTC$  の派生として、 $TTCA$ ( $TTC$  based On Constant Acceleration and Heading Angle)(Horst, 1990)がある。今回の結果から、 $1/TTC$  の知覚は、その都度の行われ、加速度を考慮する必要がないこと(Lee, 1976)が支持された。

#### 2) $TTC$ 定式化研究との差異

以前から多くの研究(Cavallo, Brun-Dei, Laya & Neboit, 1988a; Cavallo & Laurent, 1988b; Mcleod & Ross, 1983; Recarte, Nunes & Lillo, 1996; Sidaway, Fairweather, Sekiya & Mcnitt-Gray, 1996)で、 $TTC$  の定量化の研究を試みてきたが、これらの多くは、主観的な  $TTC$  の見積もりは過小評価する結果を報告している。先行研究とこれらは異なり、本研究では、実験参加者の先行車接近の  $1/TTC$  知覚の見積もりが総じて正確であることを示した。先行研究と本研究の差異は、実験プロトコルと評価方法の違いに起因すると考えられる。

##### a. 実験プロトコルの違い

本研究では、知覚を直接計測する方法を採用していた。具体的には、本節 3.4 では、マグニチュード推定法を用いて、先行車の接近度合と運転者の主観的な接近度合がリニアな関係であることを確認した。また、本章 3.3 では、各実験参加者の単純反応時間を差し引くことにより、先行車の接近開始を  $1/TTC$  で知覚していることを正確に実証した。

一方で本章3.2において、反応時間を考慮しない場合、初期車間距離が短くなるほど1/TTCを大きく見積もっていた。すなわち、TTCを過小評価していた。仮に反応時間を0.5秒とすると、1/TTCは約0.5秒の過小評価していた可能性がある、そして、その過小評価はいくつかの条件では無視できないレベルにある。図2-7と図2-8で、実験参加者の単純反応時間である0.5秒の変動幅を比較すると、0.5秒間の1/TTCの変動幅は大きく、初期車間距離が20m以下の場合には顕著である。事例を挙げると、図2-8(b)で、初期車間距離20mから先行車の減速度が $1\text{m/s}^2$ で接近した振る舞いが青線で示されている。ここで仮に1/TTCが0.25 (TTC=4)のときに実験参加者がブレーキを踏んだと仮定する。反応時間が0.5秒だと5プロット分遡るので、1/TTCは0.1秒 (TTC=10)となる。以上より、先行研究が正確な定式化に至らなかった要因のひとつとして、反応時間を考慮しなかったためと考えられる。

#### b. 評価方法の違い

正確な定式化に至らなかった別の要因として、評価方法の差異（相対比較と絶対比較の違い）も考えられる。マグニチュード推定法は、基準刺激に対する比較刺激の大きさを見積もる方法である。一方、先行研究では、“Time-to-Contact（衝突までの時間）”に対する知覚を、実験参加者の反応として計測する実験(Cavallo et al., 1988a; Mcleod et al., 1983; Recarte et al., 1996; Sidaway, Fairweather, Sekiya & McNitt-Gray, 1996)があり、絶対評価による計測が行われている。相対評価は、基準を参照しながら評価できるため、絶対評価に比べて、精度が向上する可能性がある。

#### 3) 1/TTCを使う論拠

ここで、運転者の知覚の見積もりにおいて“Time-to-Contact”の代わりに1/TTCを用いたことの重要性について、記述する。先行研究(Lee, 1976)では、視覚情報の手がかりとなる指標は、“Time-to-Contact”であったが、本研究では、あくまで逆数の1/TTCを提案する。これら2つの指標は、形式的にそれぞれの逆数であるが、特性上は異なる。

まず、本研究で先行車の接近度合の知覚量は、事実、1/TTCに依存する結果が得られた。

また、TTCの知覚は、観察者に0.2から2.0秒間程度のmargin time（余裕時間）があれば可能と言われている(Gibson, 1960; Kiefer, Flannagan & Jerome, 2006; Lee & Young, 1985; Mcleod et al., 1983)。視角変化を用いることにより、先行車接近の知覚は直接観察可能になる。しかしながら、限られたmargin timeの時間内に運転者が視覚情報として直接知覚可能な視角変化から、時間の指標であるTTCに変換するプロセスがあるのかは疑わしい。

以上のことから、直接知覚可能な指標として、時間を表すTTCではなく、視角変化に基づく1/TTCであることをここで提案する。

### 3.4.7 まとめ

先行車接近場面における先行車の接近知覚特性の定量化を行った結果、実用環境における先行車に対する主観的なリスク感は、 $1/TTC$  で定式化ができることがわかった。この結果は、先行車が一定速度で接近する場合と、先行車が一定の減速度で減速し接近する場合の両条件に対して成立することがわかった。

## 3.5 $1/THW$ と $1/TTC$ を統合したリスク感

### 3.5.1 概要

本節では、 $1/THW$  と  $1/TTC$  が先行車の追従・接近場面で支配的なパラメータであることがわかった。そこで、この両者を用いてリスク式の構築を試みる。

ドライビングシミュレータを用いて、両者を含む実験条件でリスク感の定量化を行い、 $1/THW$  と  $1/TTC$  の両者が、 $THW-1/TTC$  の位相平面でリスク感にどう影響するかを調べた。

その結果、 $1/THW$  と  $1/TTC$  の組み合わせた場合に、 $1/THW$  および  $1/TTC$  が大きくなれば、主観的なリスク値が大きくなることを確認した。

### 3.5.2 実験方法、および、実験手順

実験は、DS（本章 3.2.2 参照）を用いて実験を行った。実験は、本章 3.2 における 10 名の男性が実験に参加した。また、実験に参加するにあたり、実験の説明を受けたのち、実験参加への同意を書面で得ている。実験計画は、倫理的な配慮（脚注 6, 33 ページ）をしている。

実験は、追従状態と接近状態を含む、 $THW-1/TTC$  位相平面状の数点でリスク感を定量評価させた。図 3-18 に示すように主観的なリスク感が

- ・  $THW$  の大きさの影響を受けると思われる群（全 4 群、図中 水色）
- ・  $1/TTC$  の大きさの影響を受けると思われる群（全 3 群、図中 緑色）

の 7 群に分類し、各群内で  $THW$  あるいは  $1/TTC$  いずれかのみを変化させ、リスク感の一対比較を完備で行った。なお、予備実験により  $1/TTC$  に対する運転者の反応は、所定速度以上の場合は追従速度に依存しないことがわかったため、自車両の追従速度は 28 m/s (100 km/h) のみとした。本節では、先行車接近場面を扱うため、先行車との接近状態（車間距離など）は刺激呈示時間中に随時変化する。

また、体験的な研究では最後に見せた印象と刺激のピーク時の印象が評価の対象となることが知られている(Kahneman, 1999)。さらに、予備実験により、接近状態におけるリスク感、運転者が最後に見せた状態に支配されることが分かったため、実験参加者に最後に見

せる接近状態が、図 3-18 中の×印の THW, 1/TTC になるように相対速度、車間距離を設定した。

実験は、前述（本論文 3.2.3）のマグニチュード推定法を用いている。マグニチュード推定法は、一対比較法であり、標準刺激に対する比較刺激の大きさを実験参加者に見積もらせる方法である。具体的には、以下の手順を繰り返した。

- 1) 標準刺激の追従接近場面で、所定時間（2.5 秒）、追従接近場面呈示する
- 2) 2 秒間、先行車が消える（ブランク画面）
- 3) 次に比較刺激の追従接近場面で 1)同様に追従運転させる
- 4) 1)の標準刺激と比べ、3)の比較刺激のリスク感が何倍に感じるかを実験参加者に口頭で報告してもらう。

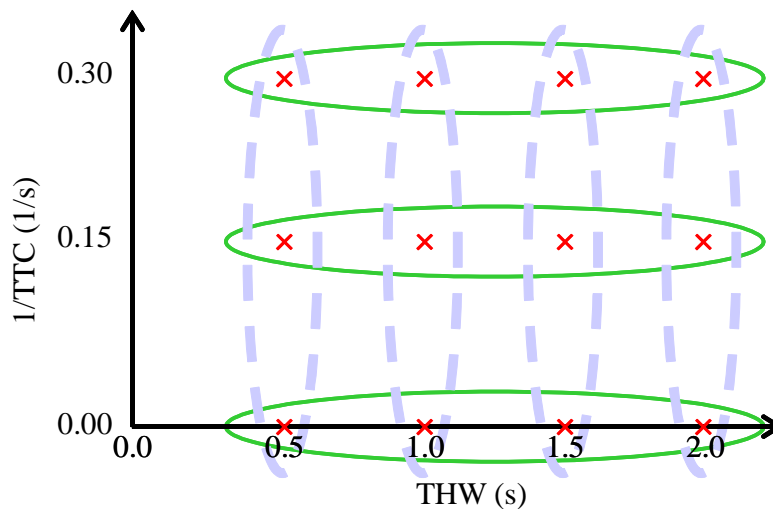


図 3-18 実験で用いた評価実験の群

### 3.5.3 実験結果

等比尺度の特性(武藤, 1982)を利用してリスク感の評価値を一般化した。実験参加者が見積もったリスク感の評価値は、等比尺度で構成されているため、比率の等価性が保証されている。よって、各評価値を乗算することで、実験のリスク感の評価値から、ある 1 点に対する全体のリスク推定値を相対的に算出することができる。そこで、 $THW=1$  かつ  $1/TTC=0$  のリスク感を 1 として  $THW-1/TTC$  位相平面上の各点のリスク感を算出した。つまり、 $THW=1$  かつ  $1/TTC=0$  のリスク感と比べて、各点で何倍のリスク感があるかを算出した。

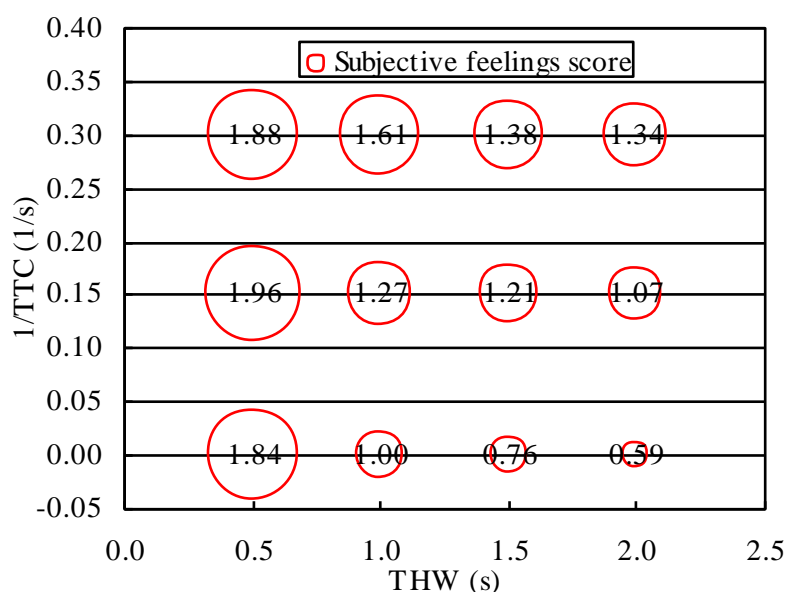


図 3-19 1/TTC-THW 位相平面における主観的なリスク感

図 3-19 に全実験参加者の平均値による THW=1 のリスク感に対する、各点における相対的なリスク感の大きさをバブルの大きさと数値で示す。本論文 3.2, 3.4 から  $1/THW$ ,  $1/TTC$  の値が大きくなると、主観的接近度合が大きくなることがわかっている。この図においても  $1/TTC$  が、先行車の視角変化量として運転者の視覚入力に依存して大きくなることから、 $1/TTC$  以外の要因がない場合、リスク感  $1/TTC$  に依存して増加するものと思われる。この図においても、同じ THW で比較した場合、 $1/TTC$  が大きいほど運転者のリスク感が大きくなる傾向が示されている。しかしながら、THW が小さい場合には、 $1/TTC$  の影響度合が相対的に小さくなり、 $1/TTC$  の大きさによらずリスク感の評価値がほぼ同じ値を示す傾向が見られた。同じ  $1/TTC$  で比較した場合、本章 3.2 の結果と同様に THW が小さいほどリスク感が大きいという結果が得られた。 $1/THW$  と  $1/TTC$  を組み合わせたときも  $1/THW$  および  $1/TTC$  が大きいとリスク値は大きくなることがわかった。

#### 3.5.4 まとめ

先行車追従・接近場面において運転者が主観的なリスク感を、ドライビングシミュレータ実験によって定量化を行った。THW が小さくなるほどリスク感が高くなり、また、 $1/TTC$  が高くなるほどリスク感が高くなることを確認した。

### 3.6 リスク式の考え方

運転中の運転者が感じる危険の概念として、ハザードとリスクという2つの概念が知られている。蓮花(蓮花 一己, 2000)は、これらの知覚について下記のように定義している。

ハザード知覚：事故に結びやすい対象や条件を予測・発見すること

リスク知覚：事故の可能性が自分にとってこの場面でどの程度あるかを評価すること

つまり、ハザードは運転中に事故に結びつきやすい対象であり、リスクはそのハザードの事故への可能性の大きさを示す。

また、先行車に対する運転者のリスク感は、潜在的なリスク感と顕在的なその2つに分類できると考えている。潜在的なリスク感は、先行車と自車の現在の状態が持続した場合、接触の可能性は低いですが、先行車の不測の挙動により接触が発生する可能性に起因するリスク感であり、指標として  $1/THW$  が相当する。一方、顕在的なリスク感は、実際に先行車に接近していて、現在の状態がそのまま継続すれば接触が確実な状態であり、指標として  $1/TTC$  が相当する。この2つの指標を利用してリスク式の構築を試みる。

### 3.7 リスク式の構築

本章 3.2 の  $1/THW$  の定量化、本章 3.4 の  $1/TTC$  の定量化、本章 3.5 の両者を組み合わせた定量化から、定常状態と過渡状態を含む、リスク感推定式の構築を試みた。実験結果より、 $1/THW$  と  $1/TTC$  により運転者のリスク感を表現できることから、定常式 (3-2) と過渡式 (3-3) を組み合わせ、リスク式として式 (3-4) を構築した。

$$RF = \frac{a}{THW} + \frac{b}{TTC} \quad 3-4$$

ここで定数  $a, b$  は、過渡項と定常項それぞれの重みを示す。

図 3-19 に示された実験結果にフィットする定数  $a, b$  を同定すると、 $a = 1, b = 5$  という結果が得られた。図 3-20 にその結果の等高線を示す。



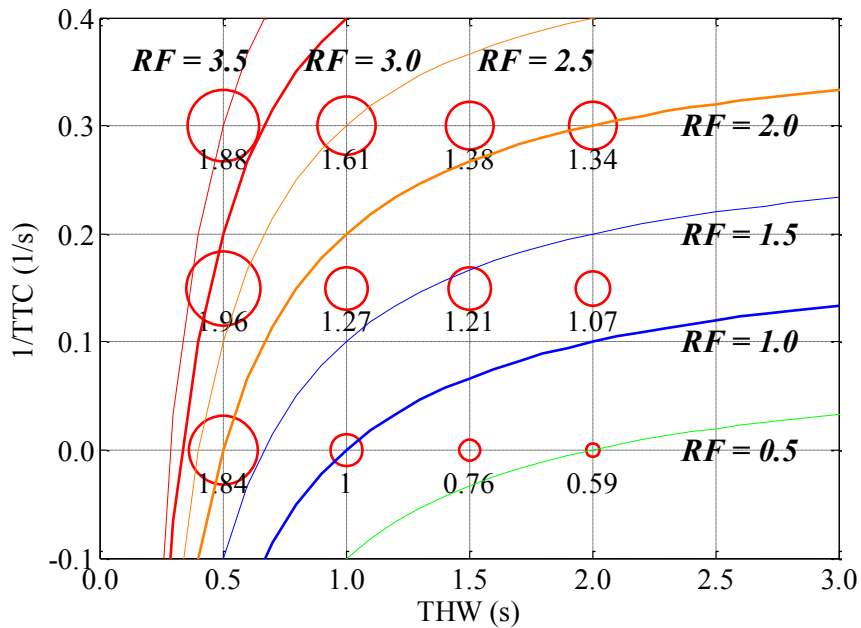


図 3-20 1/TTC-THW 位相平面における主観的なリスク感とフィッティングしたリスク式

### 3.8 結言

本章では、先行車追従・接近場面における、ヒトの知覚システムとしての支配的なパラメータを原理的、実験的に検証した。その結果、1) 先行車追従・接近場面における支配的なパラメータは、 $1/THW$  と  $1/TTC$  であること、2)  $1/THW$  と  $1/TTC$  は、それぞれ主観的な知覚量に対して線形であることがわかった。この2つのパラメータを用いて、リスク式  $RF = \frac{a}{THW} + \frac{b}{TTC}$  を構築した。DS 実験で、リスク式の  $a, b$  の重みを同定した結果、それぞれ 1 と 5 になった。この知覚特性に基づくリスク式を構築したリスク式が、運転行動にどう影響しているのかを第4章で検討する。

## 4 先行車追従・接近場面におけるリスク式と運転行動特性

### 4.1 緒言

本章では、第3章で構築した知覚特性に基づくリスク式やリスク式を構成する  $1/THW$  や  $1/TTC$  がどのように運転行動に反映されているかについて、DS 実験および、公道走行実験から検証した。

運転行動の一部は、運転者の主観的なリスク感が表出したものと仮定する。特に先行車接近場面におけるブレーキ操作開始は、先行車への接触リスクをこれ以上高めたくない意図が表出したものと考えられる。そのため、リスク式の妥当性を検証するために、運転者がブレーキ操作を開始した際の  $1/THW$  や  $1/TTC$  の値や、リスク式で算出されたリスク値で評価することは、妥当な評価方法といえる。

本章 4.2 では、再現性の高いドライビングシミュレータで運転者のブレーキ操作特性を計測し、リスク式のパラメータである  $1/THW$  と  $1/TTC$  の役割を確認した。

本章 4.3 では、様々な交通環境が含まれる公道走行実験で、第3章で提案したリスク式とブレーキ操作特性とリスク式の関係について、調査した。

さらに本章 4.4 では、安定した高速道路において公道走行実験を行い、追従場面の時間分布を、リスク式に用いられている  $1/TTC$ - $1/THW$  の位相平面上に表現し、 $1/THW$  および  $1/TTC$  の個人間差および分布を示した。

## 4.2 ドライビングシミュレータにおける運転者のブレーキ行動特性

### 4.2.1 概要

本節では、先行車接近場面におけるブレーキ操作特性を明らかにした。ドライビングシミュレータ（DS）を用いて先行車減速開始直後の、運転者の普段のブレーキ操作タイミングを調べた。

結果、先行車減速開始後の運転者のブレーキ操作タイミングは、車間距離が長い場合は  $1/TTC$  が一定になり、短い車間距離の場合は、より小さい  $1/TTC$  でブレーキ操作することがわかった。

### 4.2.2 実験方法

実験方法は、本論文 3.3 の実験に準じている。ここで本論文 3.3 の差異を説明する。本論文 3.3 は、先行車に減速に対して、先行車の接近開始を知覚したらブレーキペダルを踏むように教示されていた。一方で、本節の実験では、先行車の減速に対して、運転者が通常のブレーキ操作するタイミングでブレーキを踏むように教示した。

図 3-8 に実験に用いた DS を示す。実験参加者は、本論文 3.3 と同じ男性 8 名（平均年齢; 26.0 歳，標準偏差; 11.0 歳）であり、少なくとも週 3 回以上の運転経験がある。また、本実験に参加するにあたり、実験の説明を受けたのち、実験参加への同意を書面で得ている。実験計画は、倫理的な配慮（脚注 6，33 ページ）をしている。

実験参加者は、DS で、高速道路を模擬した道路に追従運転をしてもらった。実験条件を表 4-1 に示す。走行速度は 27.8 m/s（100 km/h）一定であり、先行車との初期車間距離は 20 m から 60 m の 4 条件、先行車の初期速度は 27.8 m/s（100 km/h）であり、先行車の減速度は  $1 \text{ m/s}^2$  から  $9 \text{ m/s}^2$  まで 9 条件を設定した。

実験参加者に、ブレーキペダルの上に右足を乗せておき、通常ブレーキを踏むタイミングでブレーキペダルを踏むように教示した。実験参加者は、DS の運転に慣れるため、実験前に練習走行を行った。実験では、運転者がブレーキペダルを踏むまで車速のコントロールは、DS のホストコンピュータによって制御された。

また、実験参加者がブレーキを踏むと判断した時間を正確に計測するために、本論文 3.3.4 で実施した反応時間を差し引く方法を適用した。

表 4-1 先行車接近のブレーキ実験のパラメータ

自車速度 (m/s)	27.8
初期車間距離 (m)	20, 30, 40, 60
先行車初期速度 (m/s)	27.8
先行車減速度 (m/s <sup>2</sup> )	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9

#### 4.2.3 実験結果と考察

図 4-1 に、先行車が初期車間距離から減速・接近し、実験参加者が普段のブレーキのタイミングでブレーキを踏んだ際の  $1/TTC$  について、初期車間距離ごとに各実験参加者の平均値を示す。この図では、実験参加者の反応時間を含んでいる。この図において、初期車間距離が短いほど、ブレーキ操作のタイミングの  $1/TTC$  の大きさが大きくなる傾向がみられる。また、個人内のばらつき（標準偏差）の外側に別の参加者の分布があることから、個人間差も大きいことが示唆される。

図 4-2 に、先行車が初期車間距離から減速・接近し、実験参加者が普段のタイミングを踏む判断をしたと推定される  $1/TTC$  について、初期車間距離ごとに各実験参加者ごとの平均値を示す。この推定結果は、図 4-1 に用いた同じデータを用いている。しかし、各実験参加者の反応時間分を差し引いた  $1/TTC$ （算出方法は本論文 3.3.4 参照）である。この図では、ブレーキペダルを踏むと判断した  $1/TTC$  の大きさは、初期車間距離 20 m の場合に小さくなる傾向があるが、ほか 30 m から 60 m はほぼ一定であることが示されている。最も小さい  $1/TTC$  で判断している実験参加者（Dr3、図中黄色）は、 $1/TTC$  が 0.11 程度であり、最も大きい  $1/TTC$  で判断している実験参加者（Dr2、図中橙色）は 0.25 以上である。この際の、実験参加者間の差（個人間差）は、ブレーキを踏むと判断をしたと推定された  $1/TTC$  に対して 2 倍以上の開きをもち、さらに各実験参加者の標準偏差を参考にすると小さくはない。

図 4-3 に、先行車が初期車間距離から減速・接近し、実験参加者が普段のタイミングを踏む判断をしたと推定される  $1/TTC$  について、初期車間距離ごとに全実験参加者の平均値を示す。この図では、図 4-2 と同様、 $1/TTC$  の大きさは、初期車間距離 20 m の場合に小さくなる傾向があるが、ほか 30 m から 60 m はほぼ一定であることが示されている。一要因分散分析を行った結果、初期車間距離の主効果が有意 ( $F(3, 273) = 9.62, p < 0.05$ ) であった。また、多重比較を行った結果、初期車間距離 20 m とそれ以外の条件 (30 m, 40 m, 60 m) で有意な差が認められた (20 m と 30 m;  $F(1, 142) = -3.30, p < 0.001$ , 20 m と 40 m;  $F(1, 142) = -3.31, p < 0.00$ , 20 m と 60 m;  $F(1, 142) = -2.53, p < 0.01$ )。

以上の結果から、リスク式の特徴を考慮すると以下のようなことがいえる。

ブレーキ操作判断のタイミングは車間距離が短い場合、より短い  $1/TTC$  でブレーキを踏み、また、車間距離が長い場合、ほぼ一定の  $1/TTC$  でブレーキを踏む傾向があることが分かった。これは、車間距離が短くなると、 $1/TTC$  の影響のみならず  $1/THW$  の影響を受けることを反映していると考えられる。すなわち  $1/THW$  と  $1/TTC$  の線形和であるリスク式は、仮に相対速度がゼロの場合（ぶつからない）でも、車間距離が短い状況（例えば 1 m）は運転者にとって安心できない状況であり、ブレーキ操作をするであろう。一方で、車間距離が長い場合には、 $1/THW$  の値はゼロに近づき存在感を潜め、 $1/TTC$  の役割が大きくなる。この状況は、車間距離が長いと  $1/TTC$  に依存（ $1/TTC$  が一定）しており、リスク式の形式が運転行動をうまく表現できていることが窺える。

また、ブレーキ操作タイミングの個人間差が知覚実験（本論文 3.3）に比べて大きいことがわかった。これは、幾何学的に決定される知覚特性には個人間に大きな差がなく、リスクテイクに関する価値や意味が異なるブレーキ操作に個人間差があることが考えられる。

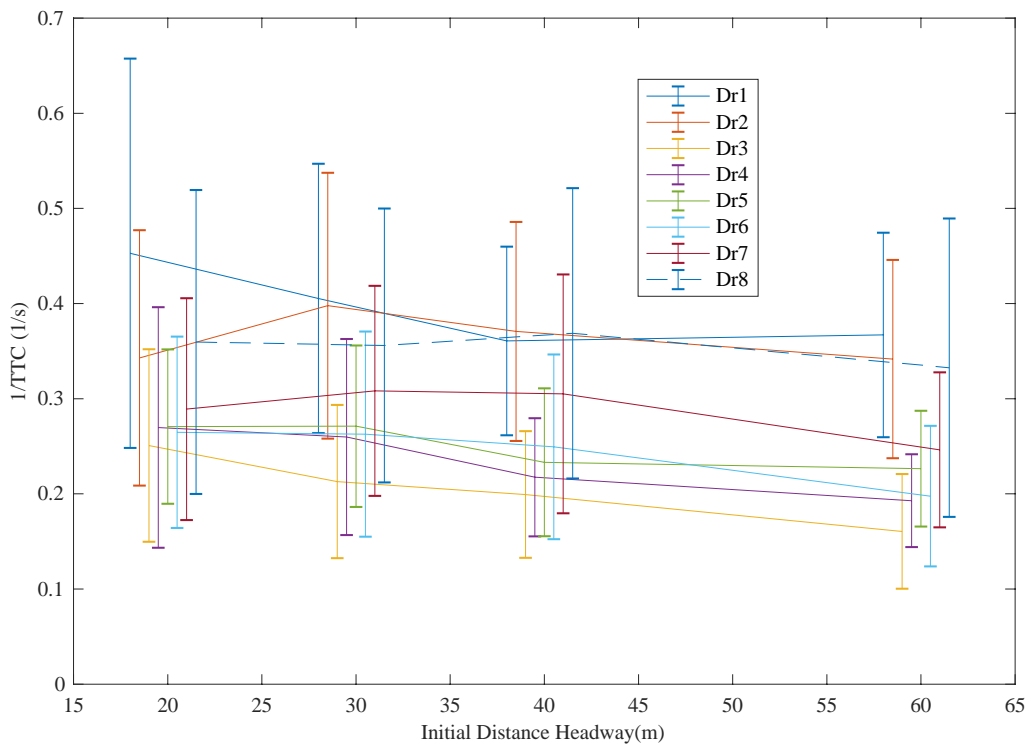


図 4-1 先行車接近時のブレーキ操作タイミング（初期車間ごと，実験参加者別）

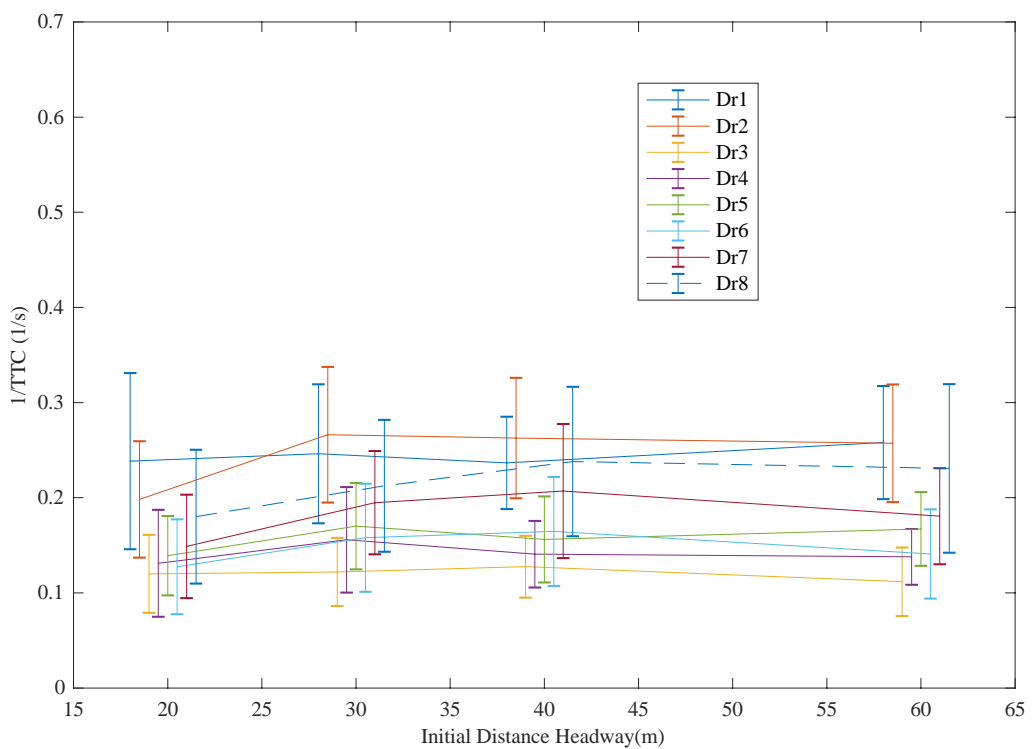


図 4-2 先行車接近時のブレーキ判断タイミング（初期車間ごと，実験参加者別）

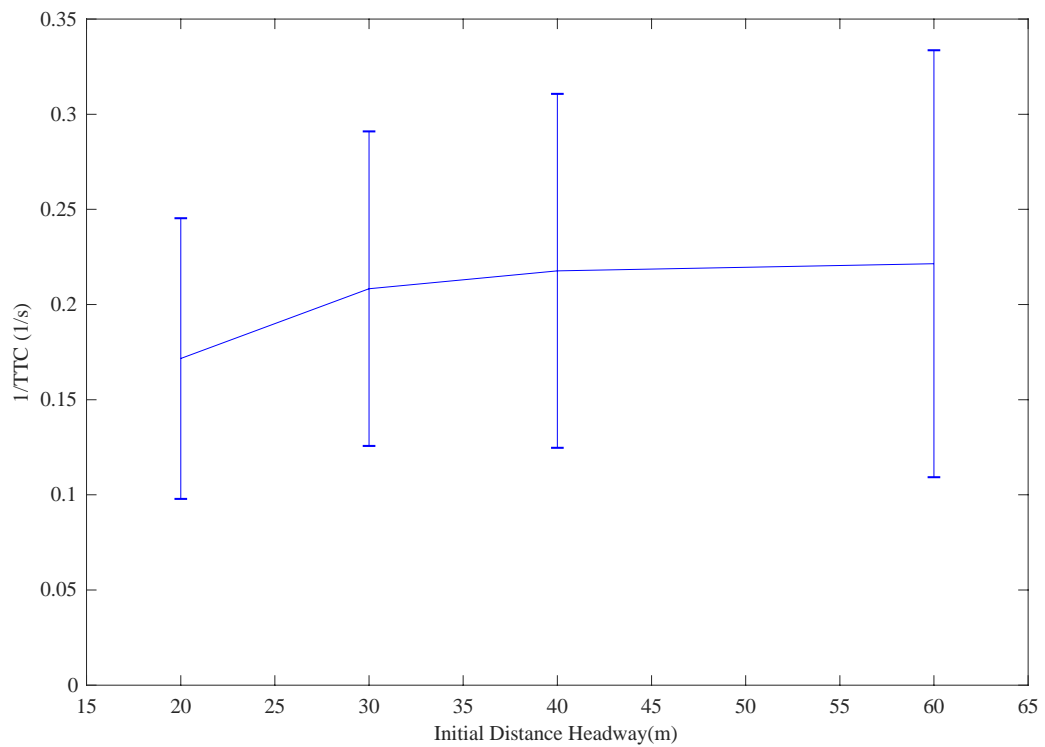


図 4-3 先行車接近時のブレーキ判断タイミング（初期車間ごと，実験参加者平均）

#### 4.2.4 まとめ

リスク式と運転行動の関係を明らかにするため，DS 実験で運転者のリスクが表出すると思われるブレーキ操作特性を明らかにした．結果，ブレーキ操作は，車間距離が長い場合には  $1/TTC$  に依存する．車間距離が短い場合には  $1/THW$  の影響を受けるとみられ，小さい  $1/TTC$  でブレーキ操作する．また， $1/THW$  と  $1/TTC$  で構成されたリスク式は，それぞれのパラメータの特性が運転者のブレーキ操作の特徴をうまく表現できていることが示唆された．また，ブレーキ操作タイミングにおいて，個人間差がみられた．

### 4.3 公道走行実験データにおけるブレーキ操作特性

#### 4.3.1 概要

リアルワールドにおけるリスク式の妥当性を検証する。リアルワールドでは、DSと比較しバリエーションに富んだ走行条件が含まれており、リスク式の妥当性検証を効果的に検証できる。そのため、先行車接近場面における特性と、運転者の主観的リスク感を定式化リスク式の関係性を公道実験で確認した。その結果、ブレーキ操作の限界値とリスク式に互換性がみられた。

#### 4.3.2 実験方法

実験は、職業運転者ではない一般の運転者 15 名（男性 12 名，女性 3 名）が実験に参加した。年齢は 24 歳から 81 歳（平均年齢 51.9 歳，標準偏差 19.2 歳）である。本実験に参加するにあたり、実験の説明を受けたのち、実験参加への同意を書面で得ている。実験計画は、倫理的な配慮をし、実験倫理委員会で承認を得ている。

実験参加者は、米国ミネアポリス・セントポール周辺のフリーウェイで幅広い速度域を実験車で走行した。図 4-4 に実験コースを示す。このコースは、①インターステート 35 号線西行き，②ミネソタ州道 36 号線，③インターステート 35 号東行き，④インターステート 94 号線周回するコースであり、交通量の多いもののおよそ 60 mph（約 96 km/h）で流れている。走行距離は 22 マイル（35 km），走行時間は 35 分である。第 3 章の DS による知覚特性の定式化実験では 5.7 m/s から 40.0 m/s の幅広い速度域で評価しているため、本検証でも DS 実験の主観的評価が、公道走行実験による客観的なリスク知覚との適合度を評価するために、全ての公道走行データが用いられた。

実験車は、排気量 4.5 リッター，セダンを用いた。この実験車には、運転者の運転操作（アクセルペダル，ブレーキペダル，ステアリング）や先行車との車間距離が計測可能であり、また、車両周囲や運転者の状況がビデオによって記録することが可能である。



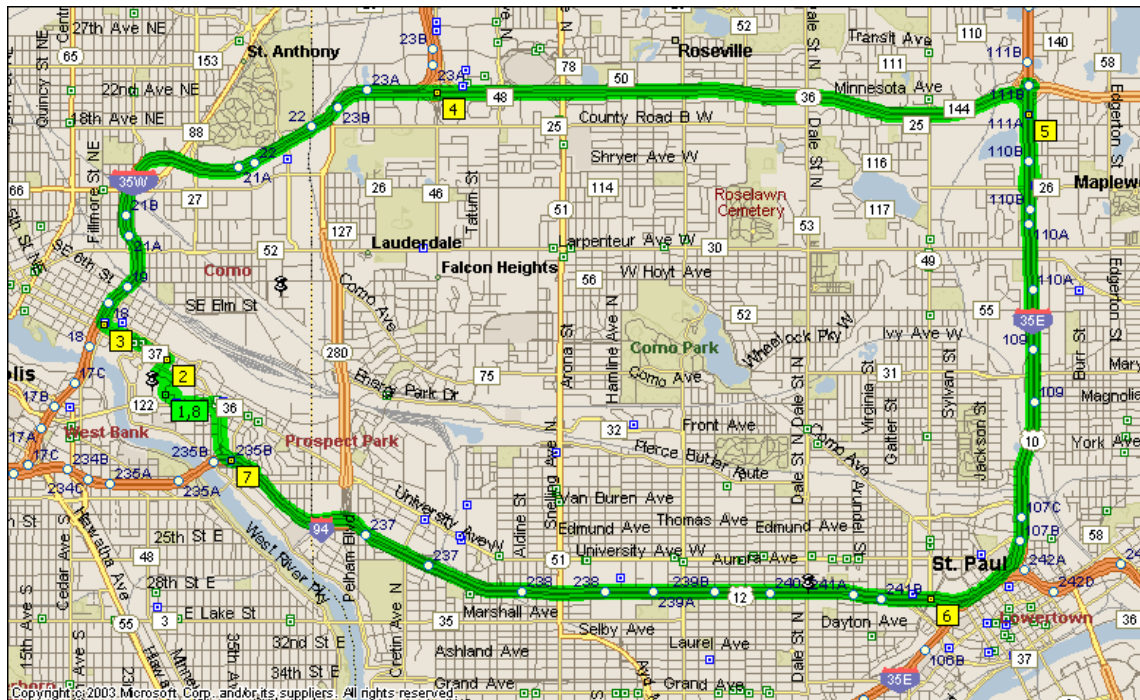


図 4-4 実験コース

#### 4.3.3 実験結果と考察

図 4-5 に本実験の全実験参加者のブレーキペダルを踏んだ際の  $1/THW$  と  $1/TTC$  を、 $1/THW$ - $1/TTC$  位相平面上に示す。この図におけるブレーキペダルは、本実験で得られた全てのブレーキデータではなく、少なくとも 4 秒以上の追従運転をしたのちにブレーキペダルを踏んだ場面のみが用いている。このブレーキ場面の限定は、ドライビングシミュレータ実験とリアルワールドの運転条件を揃える目的で行った。この結果、329 回のブレーキデータが抽出された。

図中の緑色の線は、運転者が先行車への衝突を回避する境界線を示す。この境界線は以下の手順で算出した。それぞれの  $1/THW$  のビン（データ総量と各ビンのデータ量のバランスから、 $1/THW$  の刻みが 0.25 を選定した）に対する  $1/TTC$  の 1%ile（すなわち、最も大きい  $1/TTC$  の値）の値を算出した。 $1/THW$  のビンの中心と  $1/TTC$  の 1%ile で構成された境界線は、仮説として、運転者が不快に感じると思う境界線、または、運転者がブレーキを必要とする場面を再現していると考えられる。図の境界線は、結果として下記の近似式として示される。

$$1/TTC = 0.4967 - 0.2392 / THW @ 0.5 - 0.25 / THW \quad 4-1$$

この近似式を変形すると、 $2 = 1/THW + 4/TTC$  になる。すなわち、この近似式は、DS で

主観的なリスクとしてのリスク式 ( $RF = 1/THW + 5/TTC$ ) に互換性がある。リスク値と  $1/THW$  と  $1/TTC$  の係数の差異は、DS 実験と公道実験の違い、また、リスク知覚の計測とブレーキ行動の評価の差として表現されていると考えられる。この図の境界線の解釈としては、リアルワールドにおいて、RF 値 2 以上のブレーキペダル操作は運転者に不快感をもたらすということが、示唆される。

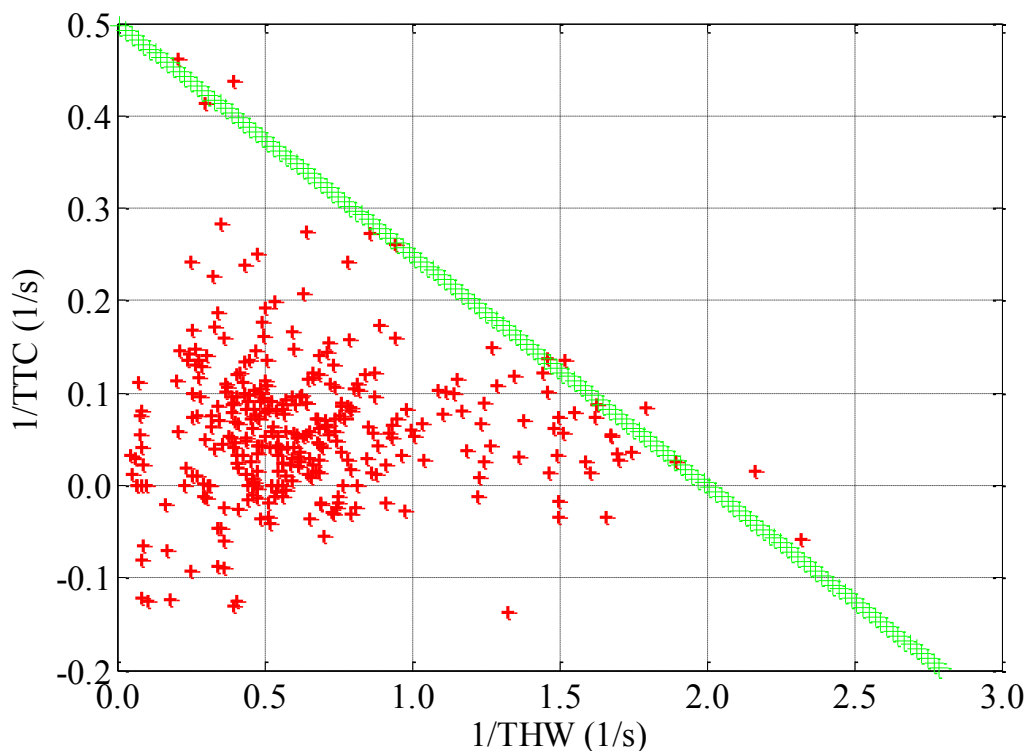


図 4-5 1/TTC-1/THW 位相平面上におけるブレーキ操作タイミングとリスク式

#### 4.3.4 まとめ

リアルワールドにおけるブレーキ操作を、リスク式の構成パラメータである  $1/THW$  と  $1/TTC$  上で確認した。

実車実験は、多様な走行条件を含むため、ブレーキ操作ポイントの限界領域に着目した結果、限界領域との境界線がリスク式と互換性を持つことがわかった。これは、認知特性から構築した主観的なリスク式が、ブレーキ操作特性をうまく表現できていることが示唆された。

#### 4.4 公道走行データを用いたリスク値と走行実験割合

##### 4.4.1 概要

前節 4.3 におけるブレーキ行動は、運転者のリスク感が表出した結果のひとつと考えられる。次に、公道の追従運転における、リスク式に用いられている  $1/THW$  と  $1/TTC$  の分布特性を調べた。本節では、アクセルやブレーキ操作した結果が追従走行の時間分布としてどのような特性があるか確認する。また、本節では、追従走行における個人間差に着目するため、安定した交通流における追従走行実験を行った。安定した交通流は個人間差が表出しやすい（図 2-4, (Ranney, 1999)）といわれており、個人間差の大きさを調査した。その結果、 $1/THW$  と  $1/TTC$  の分布特性に個人間差がみられた。

##### 4.4.2 実験方法

本実験には、男性 10 名の実験参加者が参加した。本実験に参加するにあたり、実験の説明を受けたのち、実験参加への同意を書面で得ている。実験計画は、配慮をし、実験倫理委員会の承認を得ている。実験参加者は、職業運転者ではない一般の運転者であり、実験参加者の平均年齢は、45.2 歳（標準偏差  $SD = 7.3$ , 年齢幅 = 32-54）である。また、運転経験も豊富にあり、12 年間以上の運転経験がある。表 4-2 に実験参加者のデモグラフィック特性を示す。

安定した追従場面（例えば、他の車の割り込みや、高頻度の車速変動が少ない場面）における運転者の追従特性を定量化するために、本実験は、混雑度合が高くない高速道路で実験を行った。走行コースは、東名高速道路 厚木インターチェンジから焼津インターチェンジの往復である。走行距離は、一人あたり 460 km, 走行時間はおよそ 5 時間であった。図 4-6 に、実験に用いた実験車（排気量 3.5 リッター, セダン）を示す。この実験車には、運転者の運転操作（アクセルペダル, ブレーキペダル, ステアリング）や先行車との車間距離が計測可能であり、また、車両周囲や運転者の状況がビデオによって記録することが可能である。

実験参加者は、普段と同様の運転するように教示した。ただし、安定した追従場面をできるだけ計測したいため、車線変更は極力避け、第 1 走行帯（最も左側の車線）をできるだけ走行するように求めた。また、実験参加者は、必要なときに、最寄りの休憩エリアで休憩することができる。

表 4-2 実験参加者のデモグラフィック特性

実験参加者	性別	年齢（年代）	免許取得年数	運転頻度（回／週）
Particiapant A	M	50	36	5
Particiapant B	M	50	36	7
Particiapant C	M	30	12	7
Particiapant D	M	40	20	6
Particiapant E	M	50	32	7
Particiapant F	M	40	29	1
Particiapant G	M	30	20	2
Particiapant H	M	30	19	2
Particiapant I	M	40	29	6
Particiapant J	M	40	28	7



図 4-6 実験車

DS 実験で検証している走行場面を再現し、また安定した追従場面で運転行動を評価するため、追従場面は、以下の条件を満たす場合に今回の追従場面として自動抽出した。

- ① 同一の先行車を連続して少なくとも 20 秒以上追従していること
- ② 車速が 50 km/h 以下を含まないこと

その結果、各実験参加者の総走行時間と、追従走行時間は表 4-3 のようになった。また、Participant J は、復路のデータに計測ミスがあったため、往路のデータが解析に用いられた。

表 4-3 各実験参加者の走行時間と、追従走行時間

実験参加者	総走行時間 (分)	追従走行時間 (分)
Participant A	208.8	194.3
Participant B	205.1	176.6
Participant C	207.6	155.7
Participant D	209.5	163.7
Participant E	208.9	183.8
Participant F	213.5	130.0
Participant G	210.0	190.0
Participant H	210.5	184.3
Participant I	201.6	153.9
Participant J	105.5	49.5
平均	198.1	158.2

## 4.4.3 実験結果と考察

図 4-7 から図 4-16 に、実験参加者ごとに  $1/TTC$ - $1/THW$  位相平面上に、追従場面におけるアクセルオフ (図中  $x$ )、ブレーキオン (図中  $o$ )、同一の走行頻度を表現した等高線を示す。等高線は中心の赤が 50 %ile, 橙が 75 %ile, 薄い橙が 95 %ile, 黄が 99 %ile を示す。例えば、図 4-7 (Participant A) を例にとると、この運転者は、194 分の走行時間 (表 4-3) のうち、等高線の 90 %ile (黄色) の中に 175 分間 (=194 分×90%) 留まっていたことを示す。

この図により、等高線によって包括される高さ ( $1/TTC$  の分布) と幅 ( $1/THW$  の分布) は、実験参加者間で異なることが示されている。すなわち、これは、各運転者が先行車接近に対して、 $1/THW$  と  $1/TTC$  に異なる反応をした結果といえる。

また、先行車が接近する場面において、運転行動としてアクセルオフとブレーキオンが、それぞれ 4004 件と 49 件、計測された。アクセルオフからブレーキオンへと踏み替えが行われたのは、このうちの 48 件である。この実験では、安定した追従場面で実験が行われたため、ブレーキの頻度が少なく、先行車追従制御は、アクセルペダルのみで制御が可能であったと考えられる。

表 4-4 と表 4-5 に  $1/THW$  および  $1/TTC$  のパーセンタイル値を示す。 $1/THW$  の 50%ile 値は、先行車追従場面における目標値になると考えられているが、実験参加者間のばらつきが大きく、今回の実験で最も小さい実験参加者 Participant F ( $1/THW$  50%ile = 0.335) と、最も大きい実験参加者 Participant C ( $1/THW$  50%ile = 0.710) の開きは 2 倍以上ある。時間分布に対する  $1/THW$  の値が 2 倍ということは、本論文 3.2 の DS 実験で明らかにしたようにリスク感の暴露量が 2 倍になっていることが示唆される。 $1/TTC$  に関しては、通常運転領域の上限値を表現する 75 %ile 値において、実験参加者間の最小値と最大値を比較すると 1.5 倍の差 (Participant F: 0.009, Participant I: 0.016) が出ていることがわかる。

今回走行した場面は、ブレーキ操作が多く見られないことから安定した交通流と推測でき、相対速度に依存する  $1/TTC$  に大きな差が出なかったと思われる。一方で、交通量の少ない場面では個人間差が出やすいともいわれており (Ranney, 1999),  $1/THW$  に関しては、相応の個人間差が観察されたと思われる。

表 4-4 各実験参加者の 1/THW のパーセンタイル値

Participant	1/THW								
	1%ile	5%ile	10%ile	25%ile	50%ile	75%ile	90%ile	95%ile	99%ile
Participant A	0.234	0.281	0.315	0.389	0.477	0.611	0.713	0.832	1.061
Participant B	0.261	0.315	0.351	0.406	0.477	0.565	0.685	0.778	1.019
Participant C	0.261	0.356	0.472	0.568	0.710	0.861	1.050	1.230	1.769
Participant D	0.213	0.252	0.308	0.414	0.558	0.701	0.884	1.009	1.347
Participant E	0.239	0.349	0.408	0.551	0.700	0.814	0.950	1.048	1.372
Participant F	0.203	0.233	0.240	0.282	0.335	0.405	0.513	0.608	0.955
Participant G	0.232	0.281	0.309	0.362	0.440	0.525	0.625	0.694	0.869
Participant H	0.239	0.303	0.350	0.413	0.519	0.613	0.704	0.780	0.993
Participant I	0.221	0.263	0.288	0.367	0.481	0.630	0.811	0.930	1.108
Participant J	0.203	0.235	0.261	0.343	0.479	0.631	0.810	0.859	1.038

表 4-5 各実験参加者の 1/TTC のパーセンタイル値

Participant	1/TTC								
	1%ile	5%ile	10%ile	25%ile	50%ile	75%ile	90%ile	95%ile	99%ile
Participant A	-0.050	-0.031	-0.022	-0.011	0.001	0.012	0.023	0.032	0.056
Participant B	-0.041	-0.024	-0.017	-0.008	0.000	0.010	0.019	0.026	0.048
Participant C	-0.055	-0.033	-0.025	-0.013	0.001	0.015	0.032	0.042	0.067
Participant D	-0.086	-0.044	-0.030	-0.014	0.000	0.014	0.028	0.038	0.061
Participant E	-0.058	-0.032	-0.023	-0.011	0.001	0.013	0.026	0.034	0.056
Participant F	-0.086	-0.039	-0.026	-0.012	-0.001	0.009	0.021	0.028	0.048
Participant G	-0.052	-0.029	-0.020	-0.010	0.000	0.011	0.022	0.029	0.045
Participant H	-0.057	-0.035	-0.027	-0.014	0.000	0.014	0.029	0.040	0.063
Participant I	-0.068	-0.038	-0.029	-0.014	0.002	0.016	0.032	0.041	0.062
Participant J	-0.099	-0.042	-0.027	-0.014	-0.002	0.010	0.021	0.030	0.043

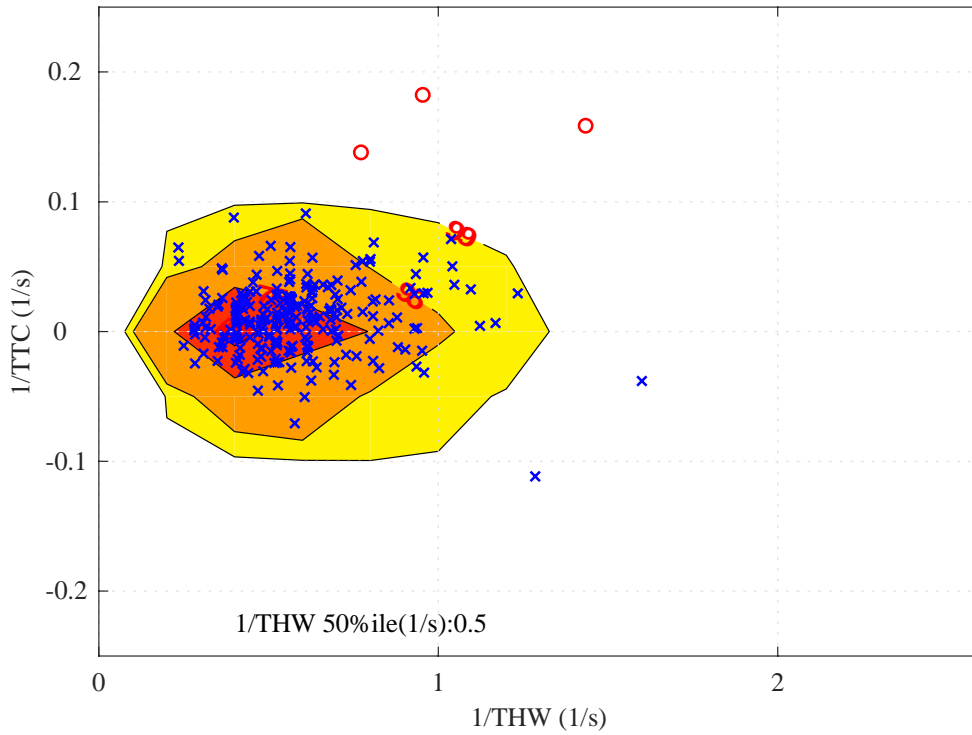


図 4-7 1/TTC-1/THW 位相平面における同一追従時間割合とペダル操作 : Participant A

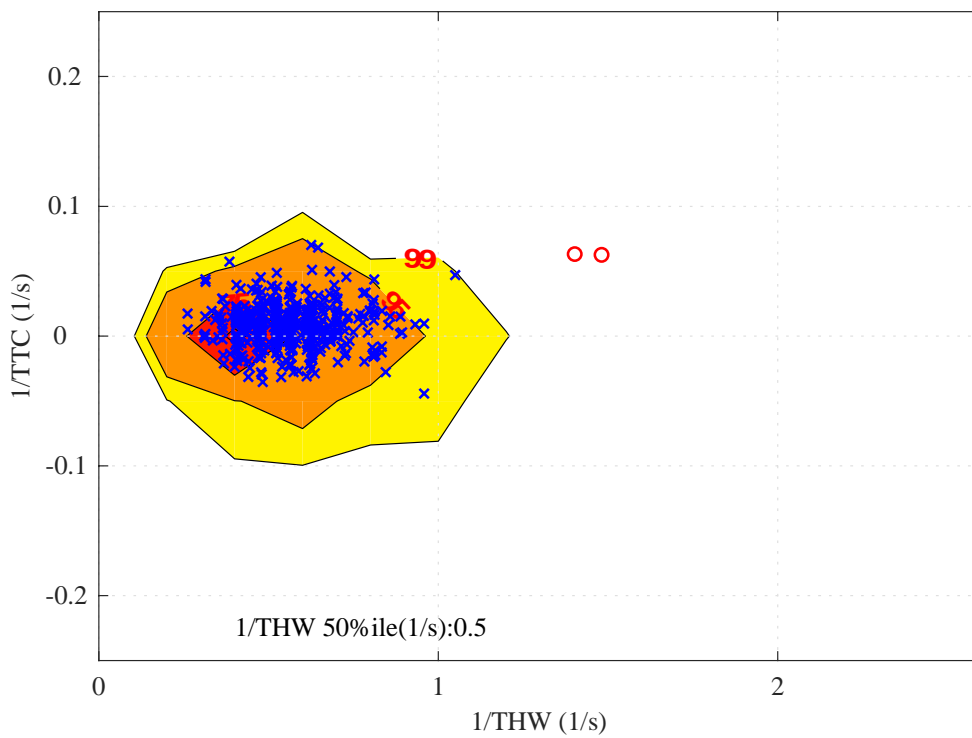


図 4-8 1/TTC-1/THW 位相平面における同一追従時間割合とペダル操作 : Participant B



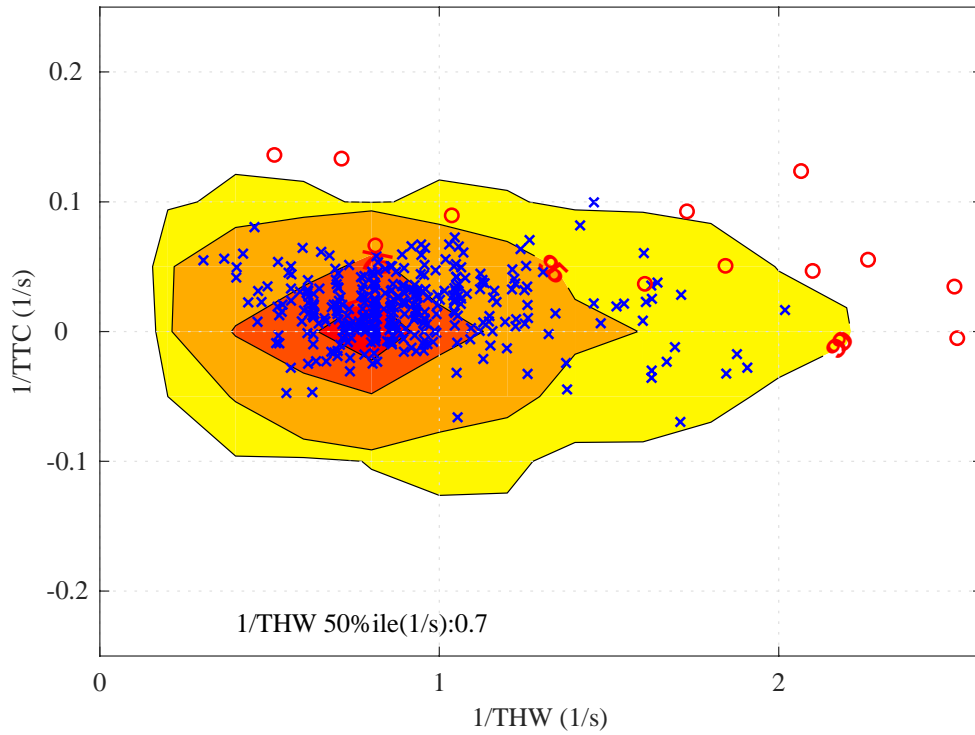


図 4-9 1/TTC-1/THW 位相平面における同一追従時間割合とペダル操作 : Participant C

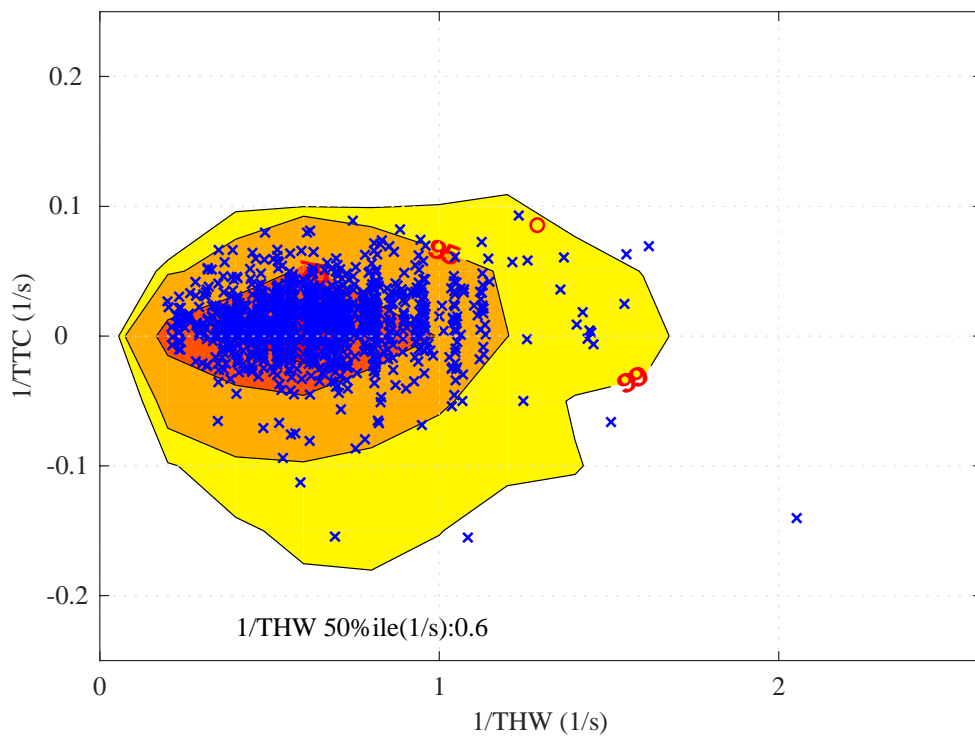


図 4-10 1/TTC-1/THW 位相平面における同一追従時間割合とペダル操作 : Participant D

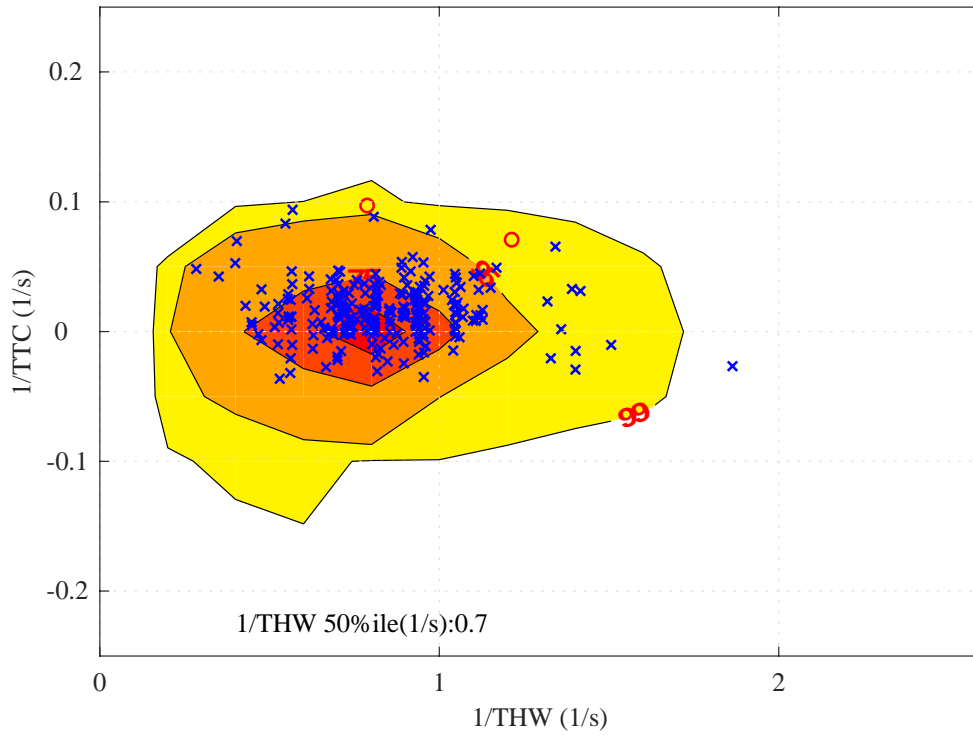


図 4-11 1/TTC-1/THW 位相平面における同一追従時間割合とペダル操作 : Participant E

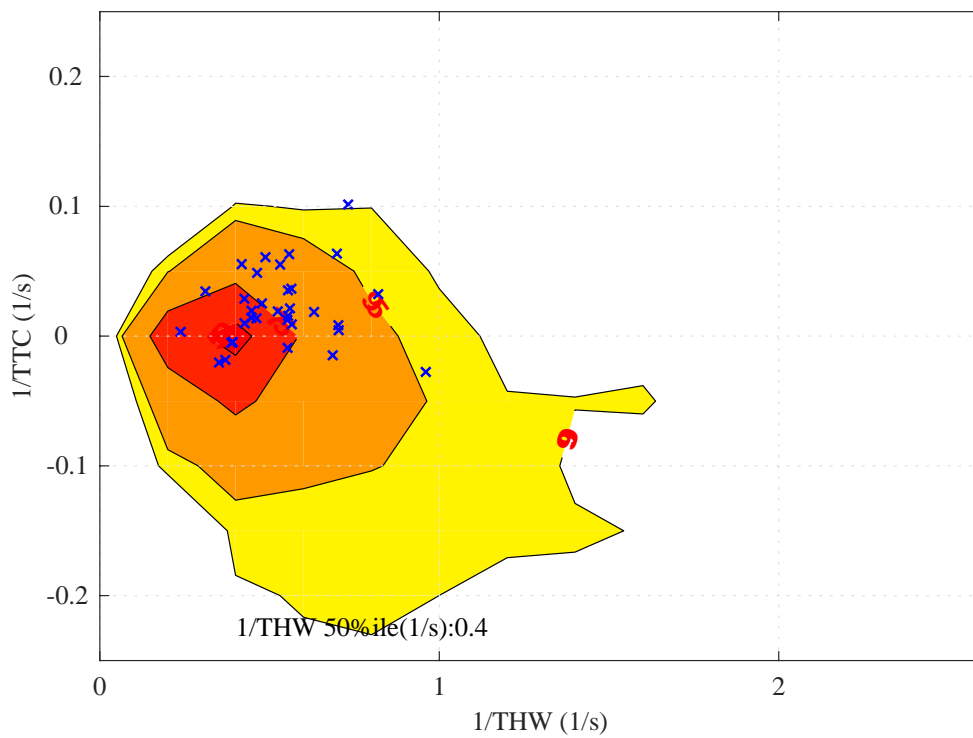


図 4-12 1/TTC-1/THW 位相平面における同一追従時間割合とペダル操作 : Participant F

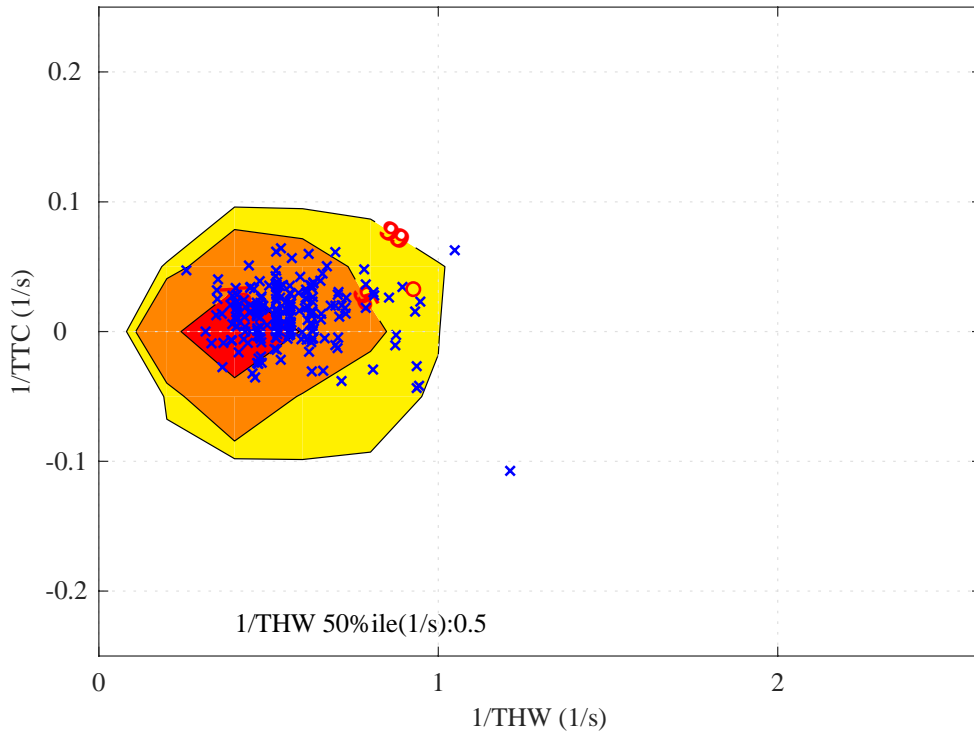


図 4-13  $1/TTC$ - $1/THW$  位相平面における同一追従時間割合とペダル操作 : Participant G

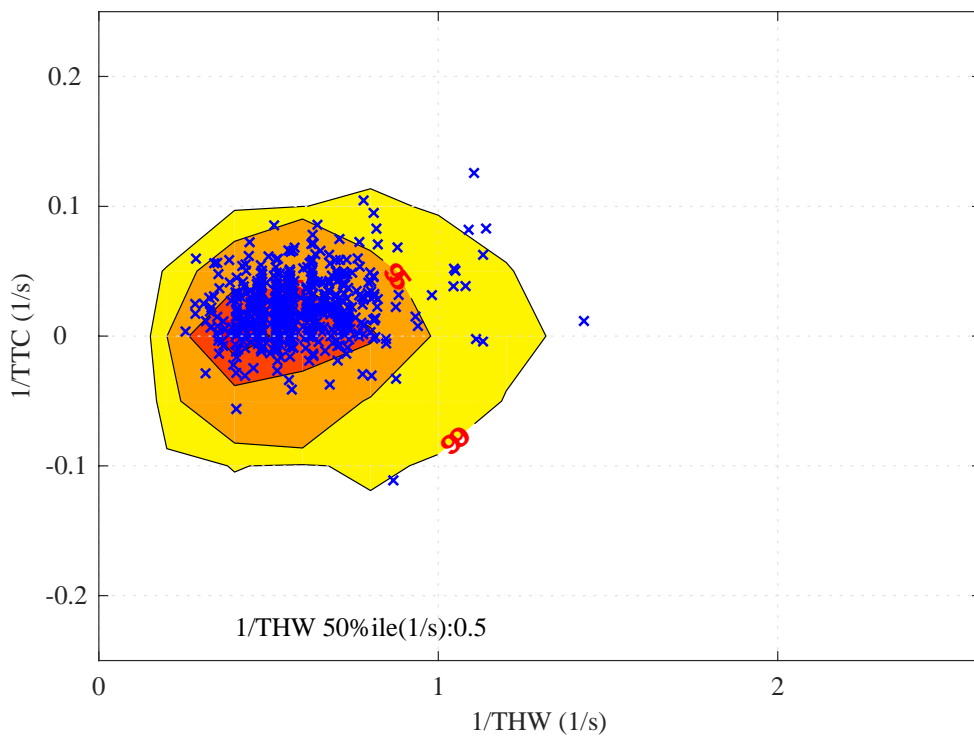


図 4-14  $1/TTC$ - $1/THW$  位相平面における同一追従時間割合とペダル操作 : Participant H

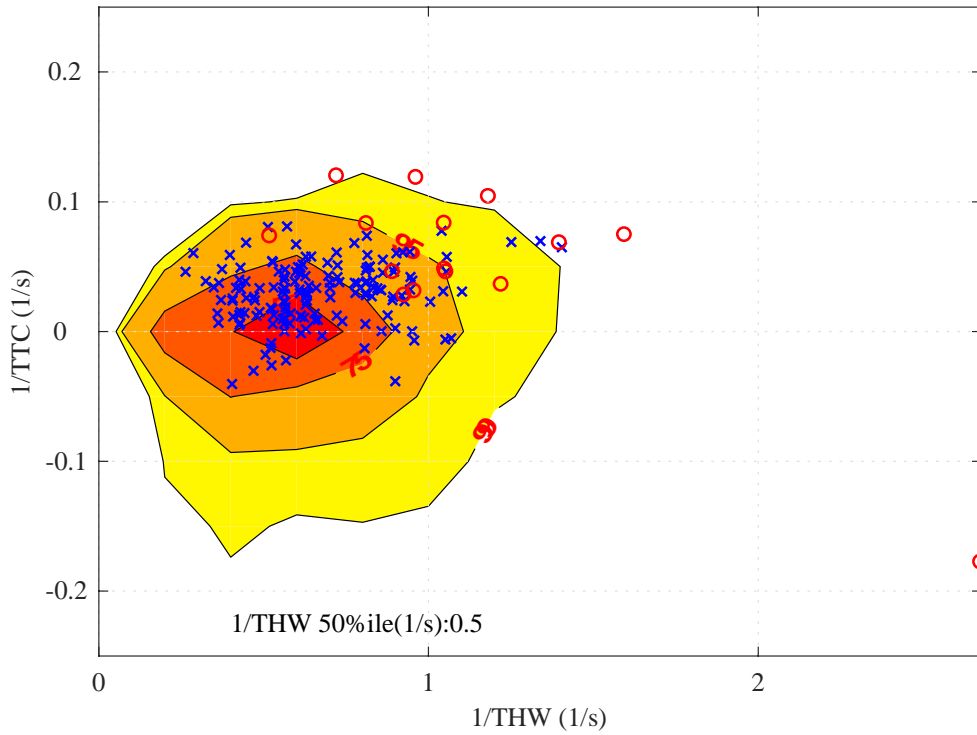


図 4-15 1/TTC-1/THW 位相平面における同一追従時間割合とペダル操作 : Participant I

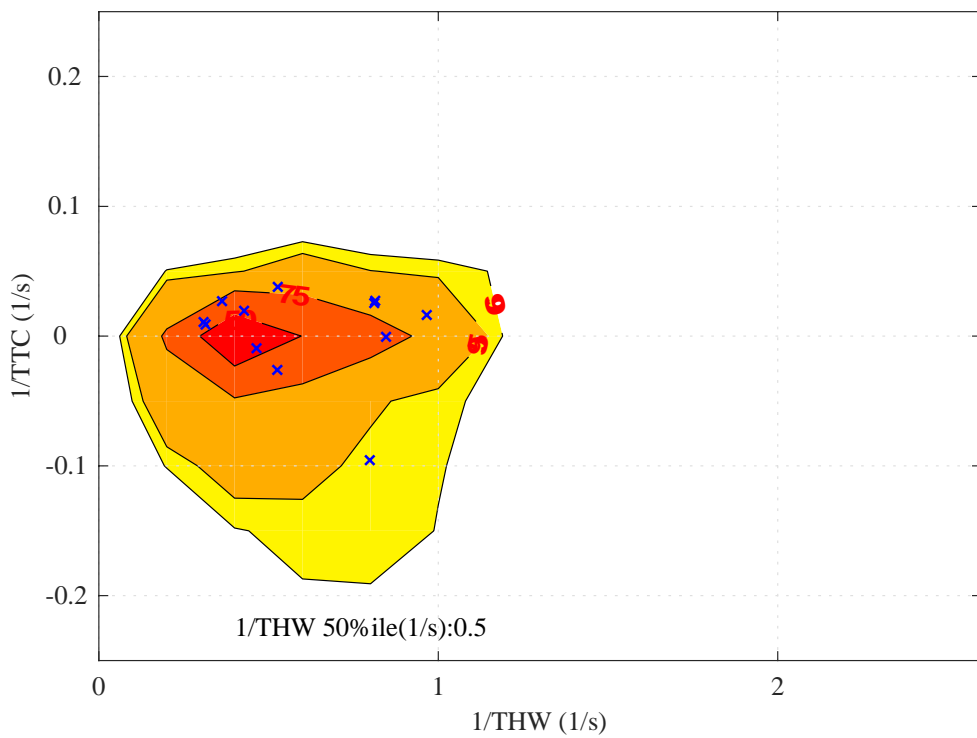


図 4-16 1/TTC-1/THW 位相平面における同一追従時間割合とペダル操作 : Participant J

#### 4.4.4 まとめ

リアルワールドのデータを用いて、安定した追従場面における追従特性を調べた。その結果、リスク式を構成している  $1/THW$  について、個人間差として2倍の開きがあることがわかった。

すなわち、追従運転では、リスクの暴露量に対する個人間差は2倍になり、リスク式は個人間差に対する対応を検討する必要があることが示唆された。

#### 4.5 結言

知覚特性に基づくリスク式やリスク式を構成する  $1/THW$  と  $1/TTC$  について、運転行動との関係を調べた。結果として、リスク式を構成する  $1/THW$  と  $1/TTC$  はそれぞれ独立した指標であり、 $1/THW$  と  $1/TTC$  の組み合わせが有効であることが、DS 実験、公道におけるブレーキ特性実験、追従走行分布から検証できた。よって、知覚特性に基づくリスク式は、運転行動評価として適用可能であることがわかった。

知覚特性とブレーキ操作特性の大きな違いは、個人間差への対応の必要性である。知覚特性では、幾何学的な知覚メカニズム（オプティカルフローによるヒトのセンシング）から考えると、個人間差を考慮する必要がないと考えられるが、一方で、行動特性は、行動発生のメカニズムの観点（目的、意味、価値、経験など）や、今回の実験結果から、個人間差への考慮が必要と考える。

## 5 個人適応型リスク式の提案とその妥当性検証

### 5.1 緒言

第2章の個人間差(本論文2.5)で触れたように、運転行動における個人間差は、各運転者の走行環境に対するリスクへの寛容さが要因のひとつと考えられる。個人間差は、運転支援システムや自動運転システムに対するユーザーの受容性などの印象や、過信などを含めたヒューマンファクターに影響を及ぼすと考えられる。また、第4章でブレーキ操作特性や追従特性に個人間差があることが改めて検証され、個人間差は軽視できるものではないことがわかった。本章では、先行車への追従・接近場面の運転者の主観的なリスクを表現するリスク式の個人適応を試みる。

本研究では、アフォーダンス研究から着想した運転者個人の運転特性を反映させた個人適応型  $RF_{ind}$  の提案を行い、その妥当性をシミュレータ実験により検証した。妥当性の検証は、先行車への接近時における運転者のアクセルペダルを離す動作(アクセルオフ)とブレーキペダルを踏む動作(ブレーキオン)の分別性能から検証した。

### 5.2 運転行動特性の違いを説明するアプローチ

従来のリスク式の課題は、運転行動に個人間差が表れているにもかかわらず個人の特性が考慮されていないことである。個人ごとにリスク感覚が異なることのひとつは、個人ごとにリスクに対する許容量が異なることである。すなわち、同一の走行環境であっても、高いリスク感や不安を覚える運転者もいれば、一方で、明確なリスク感を覚えない運転者もいる。このような個人間差の特性が運転行動の研究として調査されている。例えば、Fancherら(Fancher et al., 1996)は、運転者の先行車の追従行動を分析し、運転者ごとに追従特性を Hunters, Flow-Followers, Gliders の3つに分類した。これは運転者ごとに追従時に取るリスクの特性あるいは運転方略を示した研究といえる。また、第4章では、先行車への接近場面で、ブレーキを踏むタイミングの個人間差が大きいことを示した。第3章で構築したリスク式における2つの項の重みづけ(式(3-4)の係数  $a$ ,  $b$ )は、全実験参加者でみた場合の代表値で重みづけを行っており、この代表値の特性と乖離した実験参加者の運転行動特性は、リスク式で算出される  $RF$  値で個人の運転行動を正しく評価できていない可能性がある。本章は、この運転行動特性の個人間差を運転者の走行環境特性に対するリスク感度の差異と

考え、走行環境特性の指標（オプティカルフローなど）の意味や価値を表現することで、リスク式の個人適応を試みた。具体的には、走行環境情報から得られる特性を、個人ごとに異なる運転行動特性値で正規化・リスク感度を揃えることにより、個人適応型リスク式が構築できると考えた。なお、本研究における正規化は、個々の運転者のデータを扱いやすいように変形するという意であり、統計的な正規化ではない。本アイデアの着想は、アフォーダンス（ $\pi$ 値研究）の考え方（本論文2.6）に端を発する。 $\pi$ 値は、「行為者の特性」と「環境の特性」の比率であり、環境の特性値（ $1/THW$  や  $1/TTC$  など客観的な環境特性）を行為者の特性値（行為者の体格特性など）で正規化している。

次に運転者の運転行動特性の考え方について記述する。運転者の運転行動特性の計測は、本研究では、運転者のリスク感の特性が表れる運転行動を基準として定義した。運転者の運転行動特性は主観的評価などから計測する方法もあるが、より客観性が高く、再現性が高い運転行動から得られる値とした。本研究では先行車の追従・接近場面を対象としているため、先行車への接近に対するブレーキペダル操作のタイミングに着目した。類似する行動としてアクセルペダルを離す行動があるが、ブレーキペダルを踏む行動と比較するとアクセルペダルの操作タイミングに自由度<sup>8</sup>があるため、ブレーキ操作タイミングを採用した。

### 5.3 個人適応型リスク式の提案

本研究では、個々の運転行動を対象とし、個人適応させたRFを提案する。従来のRFを式(5-1)に示す。

$$RF = \frac{a}{THW} + \frac{b}{TTC} \quad 5-1$$

知覚-行為システムとしてのアフォーダンス（本論文2.5）は、「行為者の特性」と「環境の特性」の比であり、「行為者の特性」を運転者の運転特性（ブレーキ操作特性）として（式(5-1)の各項の重み（ $a$ ,  $b$ ）として）、とらえる。本研究では、個人の運転特性としてブレーキ操作時の  $1/THW$  と  $1/TTC$  を求めておき、これを運転行動特性値として、それぞれ  $1/THW_{ind}$ ,  $1/TTC_{ind}$  とする。運転行動特性値は、 $a$ ,  $b$  の重みに相当し、以下の式(5-2)、式(5-3)のようになる。

---

<sup>8</sup> 自動車は、車両挙動の慣性（イナーシャ）が大きいので、アクセルオフしたところで車速の低下は限定的である。そのため、先行車に接近した際のアクセルオフは、必ずしも必要に迫られて行われるとは限らず、将来の交通状況を鑑み、事前にアクセルオフしておく場合も多い。よって、運転者の内在的なリスクが比較的精度よく表出しやすいブレーキオンのタイミングに着目し、内在的なリスクの評価をブレーキオンの行動で分析する。

$$a = \left( \frac{1}{THW_{ind}} \right)^{-1} \quad 5-2$$

$$b = \left( \frac{1}{TTC_{ind}} \right)^{-1} \quad 5-3$$

これより、式 (5-1) は、式 (5-4) のような式を考えることができる。

$$RF_{ind} = \frac{1}{THW} / \frac{1}{THW_{ind}} + \frac{1}{TTC} / \frac{1}{TTC_{ind}} \quad 5-4$$

この運転行動特性値が、従来の RF の重み付けに相当する項といえる。すなわち、提案する  $RF_{ind}$  は、従来の RF の重み付けに相当する項が各指標における個々の運転者の感覚量（感度）で除算する正規化と、 $1/THW$  と  $1/TTC$  の重み付けの役割をしている。第4章の従来式では、 $1/THW$  と  $1/TTC$  の重み付けは実車実験の全実験参加者のブレーキオンの平均値から設定していたが、本研究で提案する  $RF_{ind}$  は、運転者ごとに重みを実験的に設定される。

## 5.4 個人適応型リスク式の妥当性の検証

### 5.4.1 検証手順

本研究では、式 (5-4) に示す個人適応型リスク式 ( $RF_{ind}$ ) でアクセルオフとブレーキオンの分別が表現できるか否かで妥当性の検証とする。図 5-1 に妥当性の検証方法の手順を示す。

アクセルオフとブレーキオンの分別性能で  $RF_{ind}$  の妥当性を検証する理由は、リスク式は先行車追従・接近場面の運転者の主観的なリスク感を表現した式であり、その主観的リスクのモノサシとしての役割を検証するためである。先行車の追従接近時の典型的な行動は、先行車の追従状態時に、アクセルペダルを踏んでいる状態から、アクセルペダルを離し（アクセルオフ）、さらに先行車との距離が接近する（リスクがさらに高くなる）場合はブレーキペダルを踏むこと（ブレーキオン）である。リスク式が運転者のリスク感や運転行動を正しく表現可能な尺度と仮定すると、リスク式で算出されるリスク値がある値以上でブレーキオンすることが表現でき、また、その値ではアクセルを踏んでいることはないと考えられる。アクセルオフは、ブレーキオンと比べてリスクが小さいと考えられ、この順序は不変である。

このように個々の運転者のアクセルオフとブレーキオフを正しく分別できることは、システム設計の上でも重要な技術要件になりうると考えられる。



また、本章における妥当性の検証では、リスク式の重みづけを設定するときの実験環境や実験条件による影響を排除し、個人同定した  $RF_{ind}$  の有効性を明確に示すために、従来の方式である全実験参加者の平均的な特性から重みづけを設定するリスク式  $RF_{ave}$  との比較も行った。 $RF_{ave}$  は、実験により得られた各実験参加者のブレーキオンのデータの 50%ile 値を、全実験参加者で平均した値で重みづけを決定した。以上により、このブレーキオンとアクセルオフの分別性能を旧リスク式 ( $RF$ )、個人適応型リスク式 ( $RF_{ind}$ ) と実験参加者の平均値で定義したリスク式 ( $RF_{ave}$ ) の3つのリスク式で比較し、妥当性の検証を行った。図 5-1 と以下に検証の手順で示す。

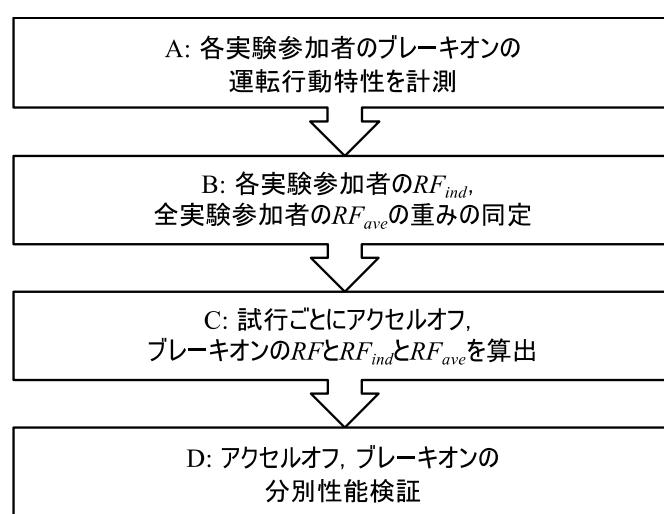


図 5-1 リスク式の妥当性検証方法

A. 各実験参加者のブレーキオンの運転行動特性を計測するため、先行車接近場面におけるブレーキオン特性 ( $1/THW$ ,  $1/TTC$ ) を計測する。各実験参加者に 50%ile 値を算出し、これらを実験参加者の運転行動特性  $1/THW_{ind}$ ,  $1/TTC_{ind}$  とする。

B. 各実験参加者の  $RF_{ind}$ , 全実験参加者の  $RF_{ave}$  の重みを A で算出した運転行動特性を用いて、実験参加者ごとに同定する。たとえば、ある実験参加者の運転行動特性であるブレーキ操作特性  $1/THW_{ind}$ ,  $1/TTC_{ind}$  がそれぞれ、0.56, 0.09 だった場合には、この実験参加者の  $RF_{ind}$  は、以下の式 (5-5) のようになる。

$$RF_{ind} = \frac{1}{THW} / 0.56 + \frac{1}{TTC} / 0.09 \quad 5-5$$

また、 $RF_{ave}$  は、全実験参加者の平均値から以下の式 5-6 で設定できる。

$$RF_{ave} = \frac{1}{THW} / \frac{1}{THW_{ave}} + \frac{1}{TTC} / \frac{1}{TTC_{ave}} \quad 5-6$$

C. 試行ごとにアクセルオフ、ブレーキオンの  $RF$ ,  $RF_{ind}$ ,  $RF_{ave}$  を算出

先行車追従・接近場面におけるアクセルオフ、ブレーキオン時の  $1/THW$  と  $1/TTC$  を用いて、 $RF$  値、 $RF_{ind}$  値、 $RF_{ave}$  値をそれぞれ算出する。

D. アクセルオフ、ブレーキオンの分別性能検証

運転者の先行車への接近に関する感覚として、アクセルオフ時よりブレーキオン時のリスク感の方が高いと考えられる。提案した  $RF_{ind}$  の妥当性を検証するために、アクセルオフ、ブレーキオンは同一指標で表現可能であり、かつ、リスク感の大小関係が明らかであるため、アクセルオフとブレーキオンの分別性能を  $RF$  値と  $RF_{ind}$  値、 $RF_{ave}$  値で比較する。

#### 5.4.2 実験装置および実験方法

実験には動揺式ドライビングシミュレータ (DS) を用いた。本 DS は、本論文 3.3 で用いた DS (図 3-8) と同じである。実験は、高速道路を模擬した直線区間において、先行車の追従場面の走行を 20 分間、先行車に追従運転を行う。図 5-2 に先行車の走行パターンと実験参加者の走行データの一例を示す。先行車は、上限車速  $80 \pm 5$  km/h、下限車速  $50 \pm 5$  km/h で一定速での走行後、緩やかな加減速を繰り返す。先行車は減速イベント内でランダムに 20 km/h まで 3 回減速する。また、実験参加者には、普段の運転と同様に、加減速を繰り返す先行車と安全な車間を保ち追従するよう教示した。実験参加者は、21~65 歳 (平均 27.8 歳、標準偏差 12.9 歳) の健康な男性 12 名とした。実験実施前に、書面と口頭により実験内容を説明し、同意書により実験参加への承諾を得た。実験計画は、倫理的な配慮 (脚注 6, 33 ページ) をしている。実験参加者は、普通自動車免許を有し、また、週に 1 回以上自動車の運転を行っていた。表 1 に実験参加者の属性を示す。

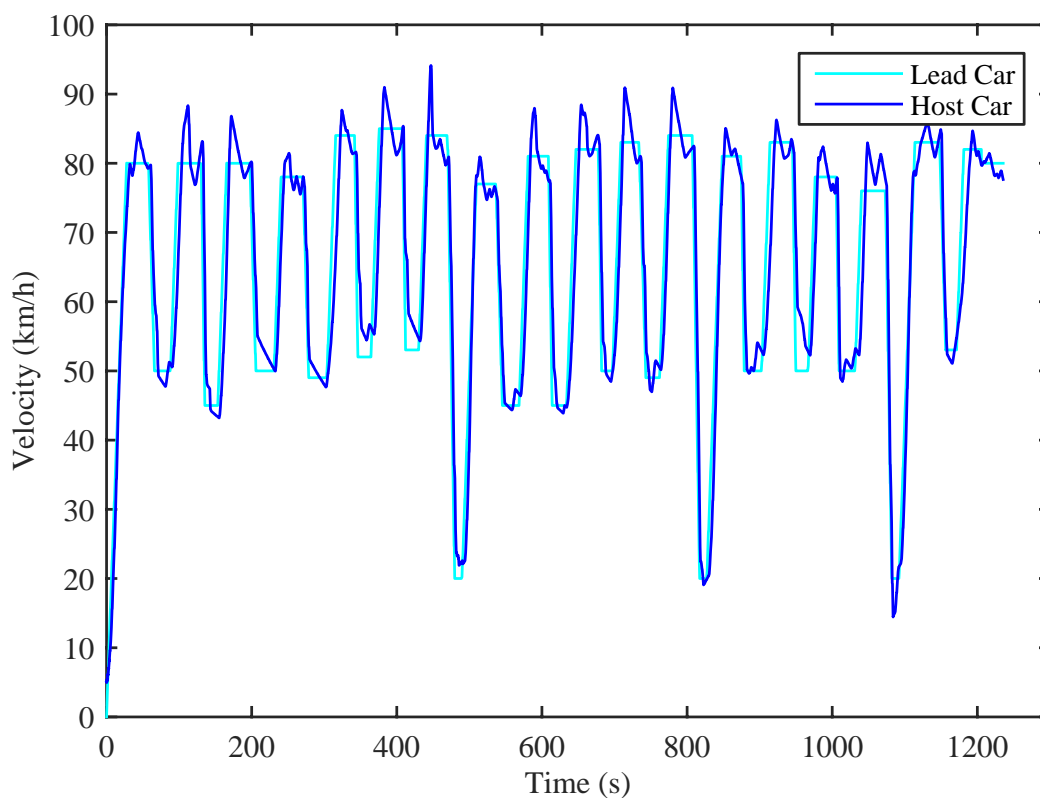


図 5-2 先行車走行パターンと実験参加者の走行データ

表 5-1 実験参加者の属性

実験参加者番号	性別	運転免許保有年 (年)	運転頻度 (回/週)
1	男性	2	5-
2	男性	3-5	3-4
3	男性	10	1-2
4	男性	2	1-2
5	男性	2	3-4
6	男性	10	3-4
7	男性	3-5	5-
8	男性	10	1-2
9	男性	3-5	3-4
10	男性	3-5	3-4
11	男性	3-5	1-2
12	男性	3-5	5-

### 5.4.3 分析方法

ブレーキオンのタイミングを計測する際に、実際にブレーキペダルを踏んだタイミングは、 $1/TTC$  の特性により、先行車の接近条件の影響を受けやすいことがわかっている（本論文 2.3.3）。そこで、本論文 3.3.4 で用いた分析方法を適用し、実際にブレーキを踏んだタイミングから単純反応時間分を差し引き、本節でもブレーキオンの判断タイミングを推定、算出した。単純反応時間は本論文の 3.3.4 を参照すると 0.40~0.49 秒程度である。本章では、実験参加者各々の単純反応時間の差異は小さいと判断し、一律にその平均値である 0.45 秒に設定した。

ブレーキオンの判断タイミングは、DS のブレーキペダルに備え付けられた踏力計が 1.5 N 以上でブレーキ操作したと判定した。本研究におけるブレーキオンおよびアクセルオフは、この反応時間分（0.45 秒）が差し引かれている（ペダル操作を行ったタイミングから反応時間を遡った時刻における車間距離と相対速度から  $1/THW$  および  $1/TTC$  が算出されている）。

以上の手続きで算出したアクセルオフの判断タイミングおよびブレーキオンの判断タイミングの  $1/THW$  と  $1/TTC$  を各々の先行車接近の試行ごとに算出した。また、RF を実験参加者ごとに同定するために、ブレーキオンの判断タイミングの  $1/THW$  と  $1/TTC$  を実験参加者ごとの全試行の平均値、すなわち、 $1/THW_{ind}$  と  $1/TTC_{ind}$  を算出した。

## 5.5 実験結果

実験で計測された実験参加者のアクセルオフ、ブレーキオンのデータは、実験参加者一人当たり 17~19 回であり、総量は 212 回になる。

図 5-3 から図 5-14 からにブレーキオンの判断タイミングの  $1/THW$  と  $1/TTC$  を実験参加者ごとに示す。また、各グラフの下端および左端のグラフは、 $1/THW$  軸または  $1/TTC$  軸の観点でみた確率密度分布を示す。さらに、分布図の太い実線は、その分布における 50%ile 値を示す。分布をみると、実験参加者ごとに分布の範囲にばらつきがある。

表 5-2 に実験参加者ごとのブレーキ操作判断タイミングの  $1/THW$  と  $1/TTC$  の平均値、 $1/THW$  と  $1/TTC$  の比率、表の最下行に全実験参加者の平均値を示す。 $1/THW$  と  $1/TTC$  の実験参加者の平均値でみると個人間差としてそれぞれ約 3 倍、2 倍あり、リスク感としてもそれぞれ 3 倍、2 倍あり、個人間差が小さくないことが示されている。また、ブレーキ操作判断時の  $1/THW$  と  $1/TTC$  の比率 (RF の重み付けの比率) にも個人間差があることがわかる。すなわち、リスク式における  $1/THW$  と  $1/TTC$  の重みづけは、それぞれの指標で独立して扱

う必要があることを示唆する。図 5-15 に全ての実験参加者ごとの平均値を示す。また、図中のエラーバーは標準偏差を示す。これより、実験参加者間のばらつきは、各実験参加者の標準偏差の外に概ね存在することから、個人間差が小さくないことがわかる。

以上の実験結果より得られた実験参加者ごとの  $1/THW$  と  $1/TTC$  の 50%ile 値 (表 5-2) を  $RF_{ind}$  の係数 (すなわち、 $1/THW_{ind}$  と  $1/TTC_{ind}$ ) として設定した。また、全実験参加者のブレーキ操作判断時の平均の  $1/THW$  と  $1/TTC$  (表 5-2 の最下行) を  $RF_{ave}$  の係数 (すなわち、 $1/THW_{ave}$  と  $1/TTC_{ave}$ ) として設定した。

次に、アクセルオフとブレーキオンの試行 (全 212 試行) ごとに、従来の  $RF$  値、 $RF_{ind}$  値、 $RF_{ave}$  値を算出した。図 5-16 に  $RF$  のアクセルオフの分布とブレーキオンの分布を、図 5-17 に  $RF_{ind}$  を、図 5-18 に  $RF_{ave}$  をそれぞれ示す。また、アクセルオフの累積頻度分布は、100% から引いた値を示す。これらの分布を用いて、アクセルオフとブレーキオンの分別性能をそれぞれ分析した。分別性能は、図 5-16 から図 5-18 のアクセルオフとブレーキオンの累積頻度分布における交点の検出性能を調べた。また、この交点をアクセルオフとブレーキオンの分別の閾値とした。図中において、アクセルオフとブレーキオンがうまく分別されている場合は、分布が重複している領域が小さくなる。

表 5-3 に本分析における検出の定義について示す。ブレーキオンを検出目標とすると、運転者がブレーキオンしている場合に、 $RF$  値が交点である閾値を超えている場合 (ブレーキオンと推定) には正検出 (True-positive)、閾値を超えていない場合 (ブレーキオフと推定) には非検出 (False-negative) である。また、ブレーキオンの閾値を超えている場合 (ブレーキオンと推定) に、運転者がアクセルオフをしていない (アクセルオン) 際は、誤検出 (False-positive) である。上記の閾値をブレーキ操作の判断タイミングの閾値とした場合に、正検出率は「閾値以上のブレーキオンの回数」を「閾値以上のアクセルオフとブレーキオンの回数」で除算した値とした。一方、誤検出率は「閾値以上のアクセルオフの回数」を「閾値以上のアクセルオフの回数とブレーキオンの回数」で除算した値とした。図 5-19 にこれらの関係性の概念図を示す。図 5-20 に概念図上に、これらの3つの指標における各検出件数を示す。従来のリスク式  $RF$  は、正検出 185 件、誤検出 27 件、非検出 17 件であった。個人適応型リスク式  $RF_{ind}$  は、それぞれ 209 件、3 件、2 件。平均値で得たリスク式  $RF_{ave}$  は、199 件、13 件、7 件であった。図 5-16 から図 5-18、図 5-20 より、運転者の運転行動特性が反映されている  $RF_{ind}$  が、アクセルオフおよびブレーキオフの分別ができていることが示されている。

表 5-4 に図 5-16 から図 5-18 のアクセルオフとブレーキオンの累積頻度分布の交点における  $RF$ 、 $RF_{ind}$ 、 $RF_{ave}$  の正検出率および誤検出率を示し、表 5-5 に  $RF_{ind}$ 、 $RF$ 、 $RF_{ave}$  の正検出率および誤検出率の改善効果を示す。 $RF$  のブレーキ操作に関する誤検出率は、 $RF=0.6$

を閾値と設定した場合に、正検出率は 87.3 %、また、誤検出率は 8.4 %であった。一方で、 $RF_{ind}$  の検出性能は、 $RF_{ind}=1.2$  を閾値と設定した場合に正検出率は 98.6 %、誤検出率は 0.9 %であった。また、 $RF_{ave}$  の検出性能は、 $RF_{ave}=1.1$  を閾値と設定した場合に正検出率は 93.9 %、誤検出率は 3.4 %であった。この両者の分別性能を比較すると、 $RF_{ind}$  は  $RF$  に比べ、正検出率は 12.9 %、誤検出率は 89.2 %向上する。また、 $RF_{ave}$  に比べ、正検出率は 5 %、誤検出率は 73.5 %向上する。

図 5-21 に閾値を変化させた場合の検出性能（受信者動作特性曲線）を示す。これより、 $RF_{ind}$  が  $RF$  や  $RF_{ave}$  に比べて、運転者のブレーキ操作を総じて高精度に検出できていることがわかる。

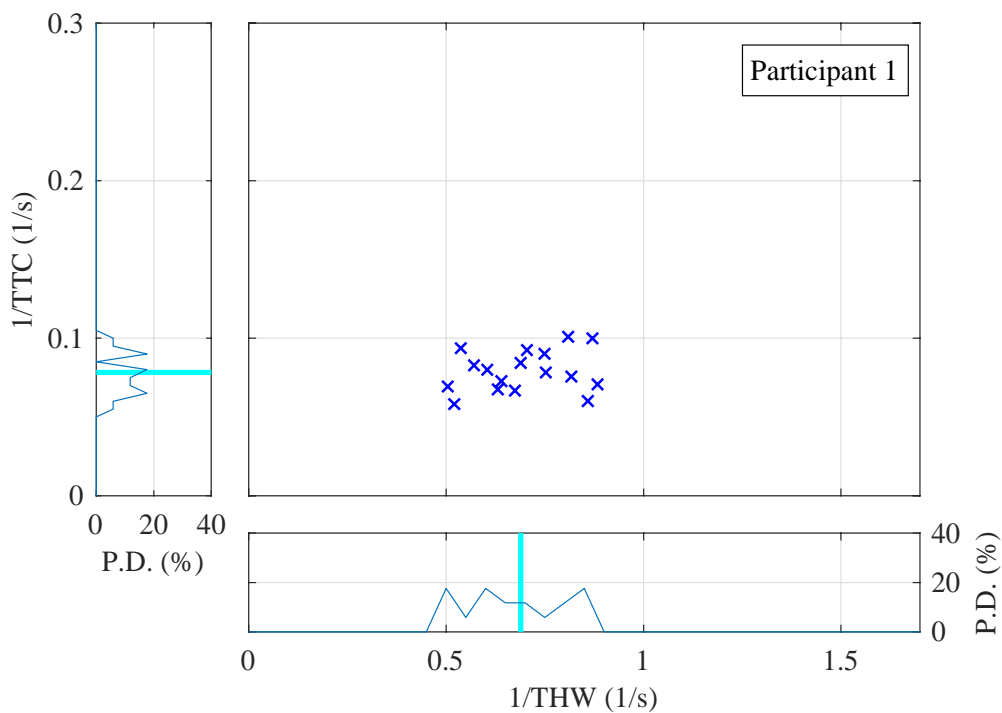


図 5-3 1/THW-1/TTC 位相平面におけるブレーキ操作特性 (Participant 1)

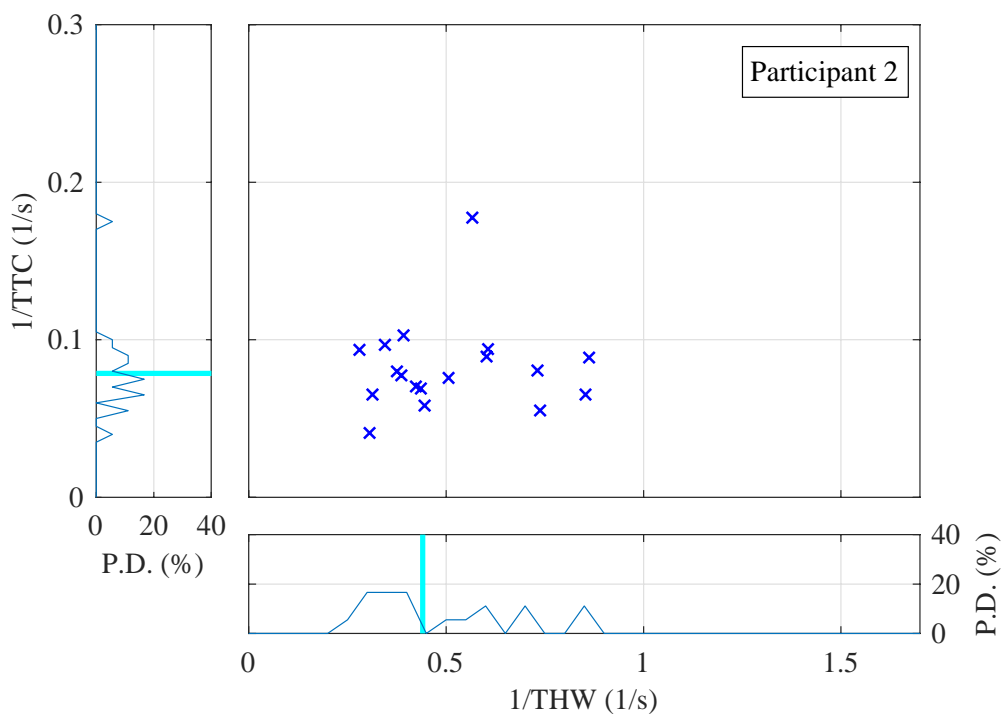


図 5-4 1/THW-1/TTC 位相平面におけるブレーキ操作特性 (Participant 2)

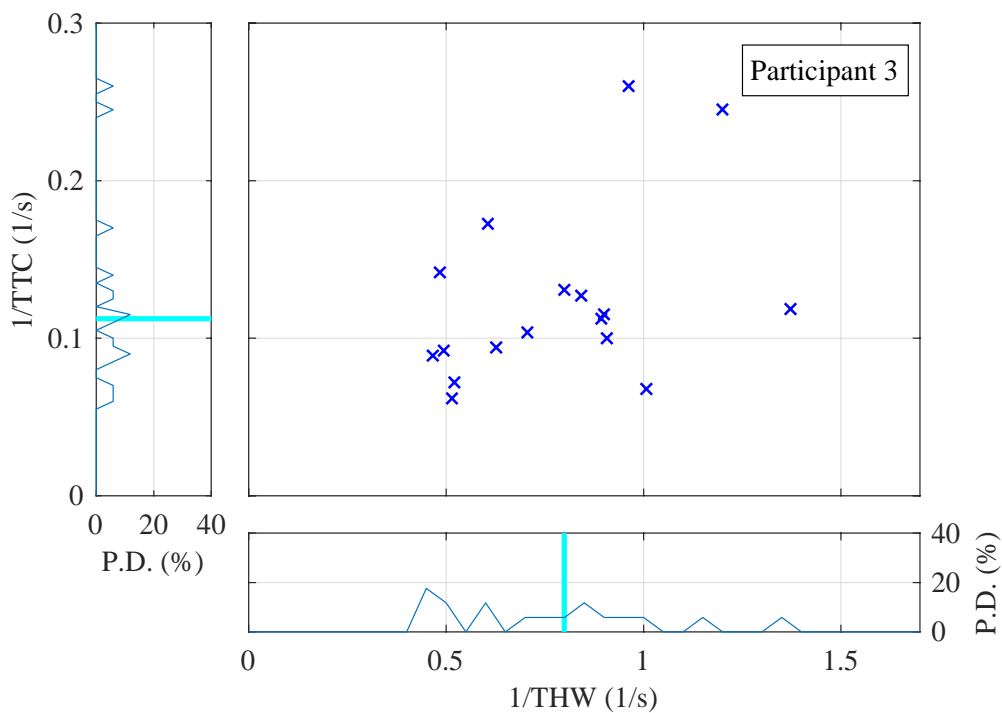


図 5-5 1/THW-1/TTC 位相平面におけるブレーキ操作特性 (Participant 3)

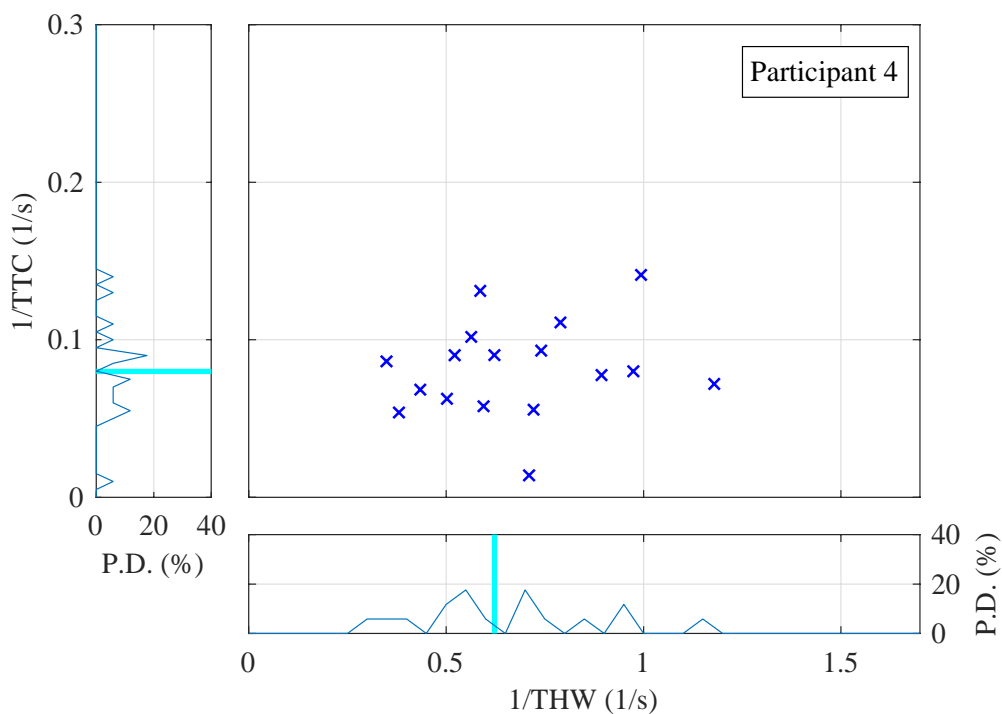


図 5-6 1/THW-1/TTC 位相平面におけるブレーキ操作特性 (Participant 4)



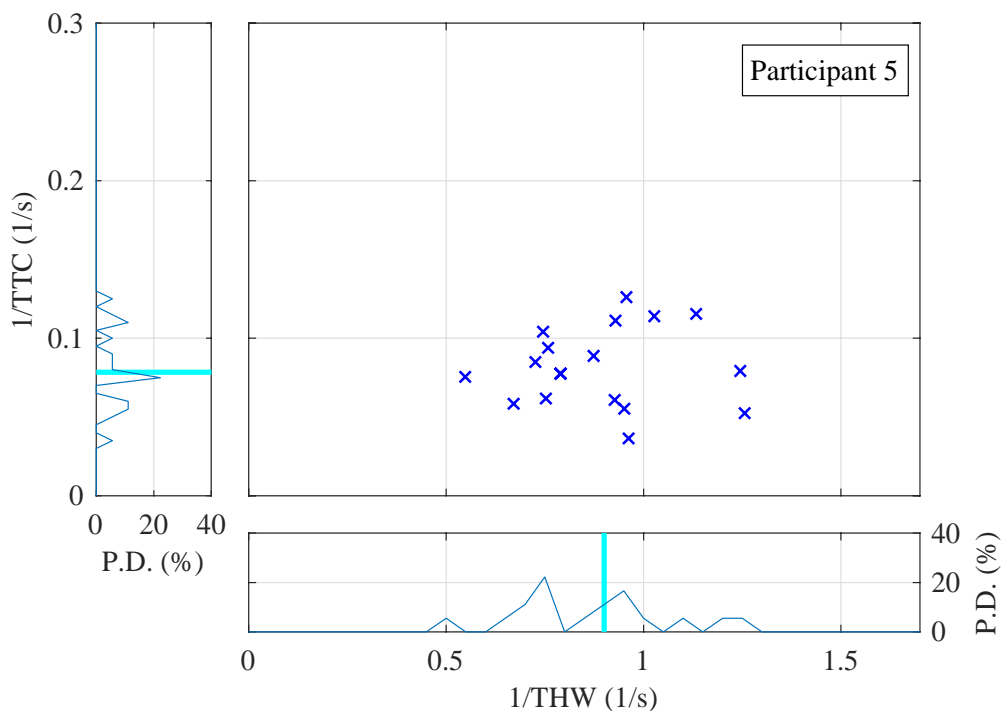


図 5-7 1/THW-1/TTC 位相平面におけるブレーキ操作特性 (Participant 5)

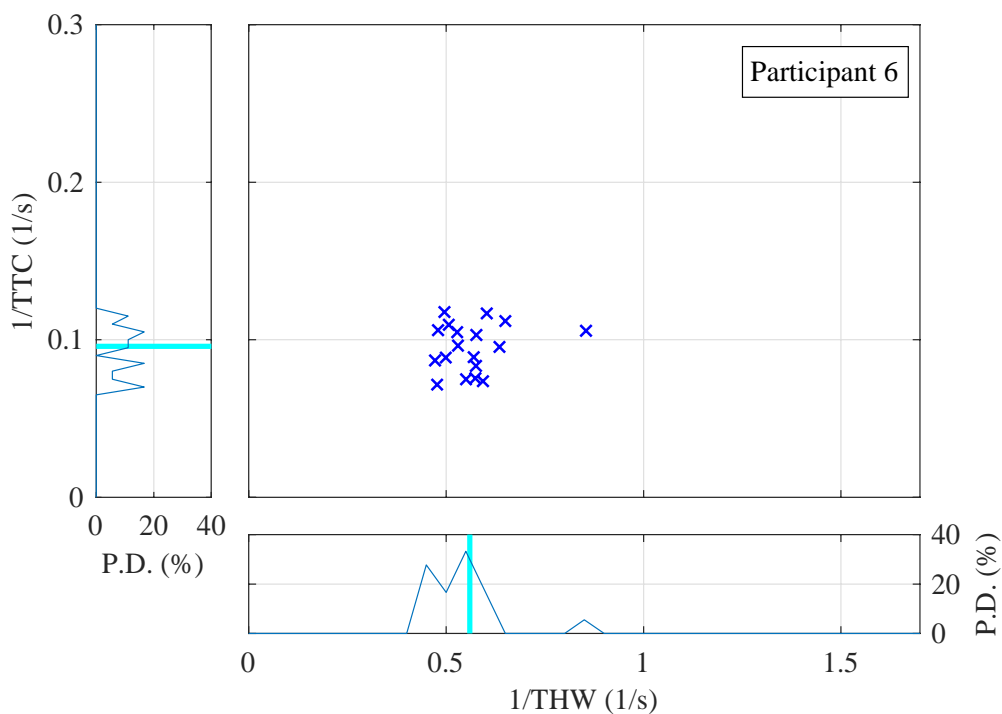


図 5-8 1/THW-1/TTC 位相平面におけるブレーキ操作特性 (Participant 6)

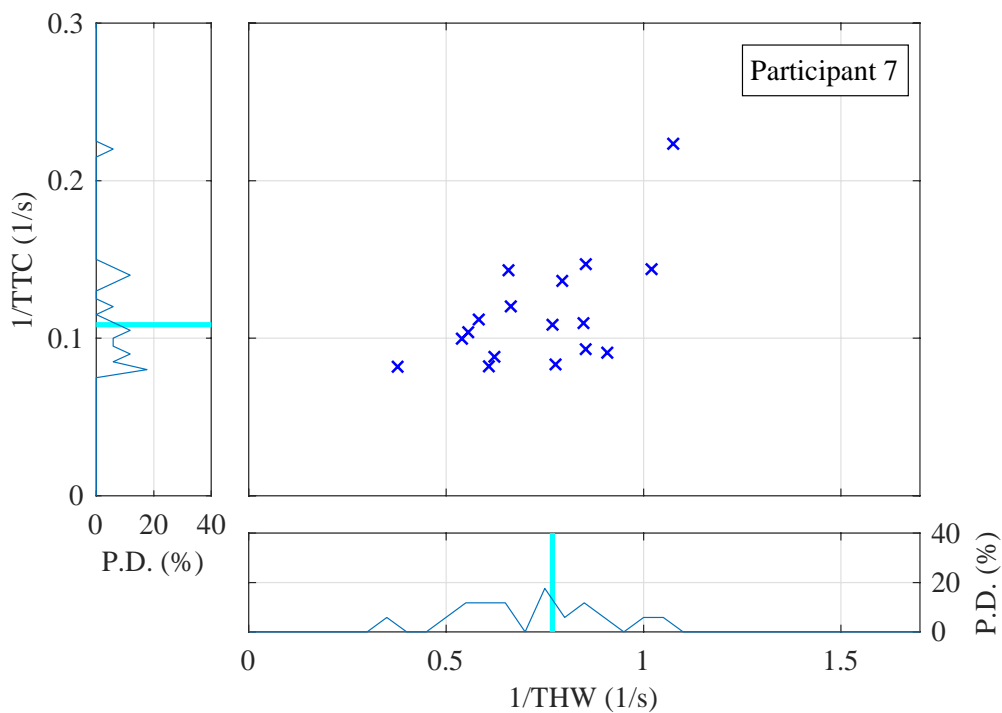


図 5-9  $1/THW$ - $1/TTC$  位相平面におけるブレーキ操作特性 (Participant 7)

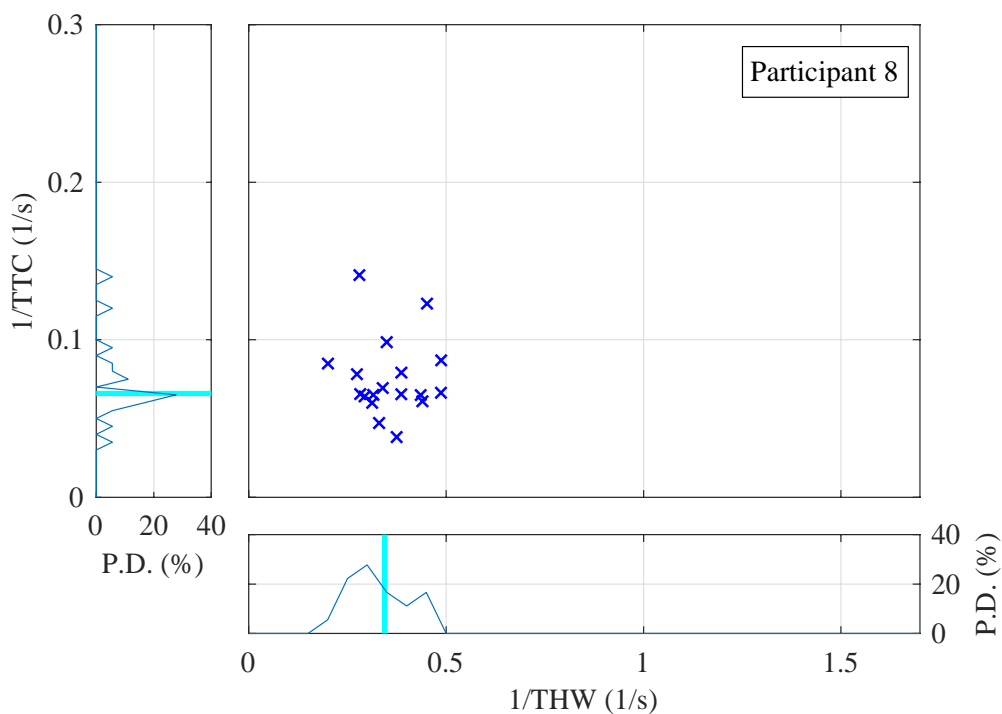


図 5-10  $1/THW$ - $1/TTC$  位相平面におけるブレーキ操作特性 (Participant 8)

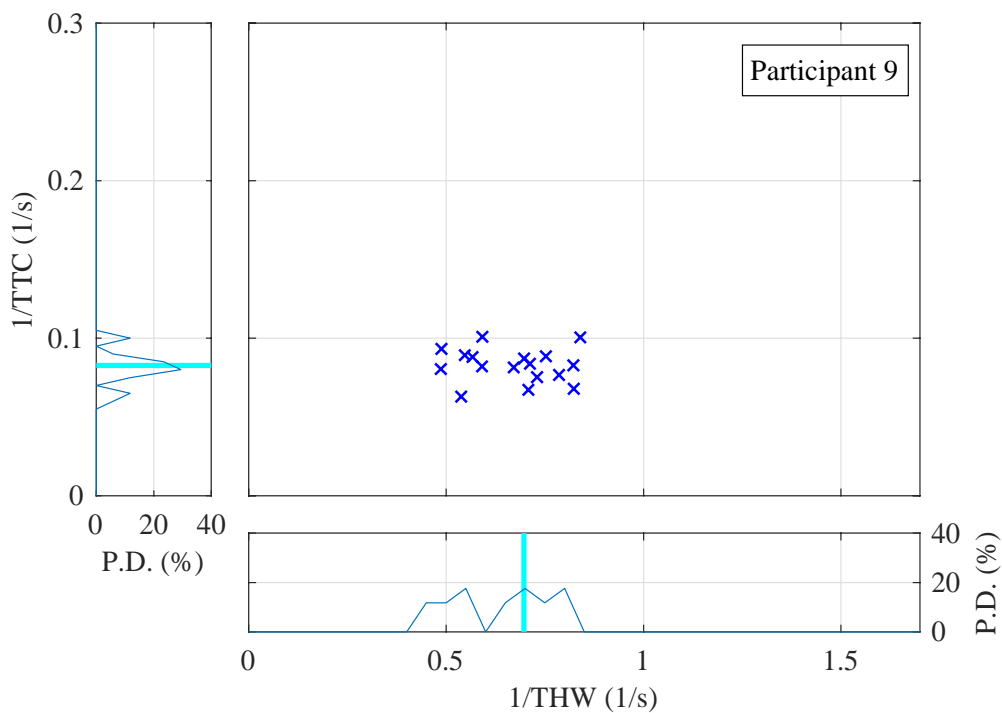


図 5-11 1/THW-1/TTC 位相平面におけるブレーキ操作特性 (Participant 9)

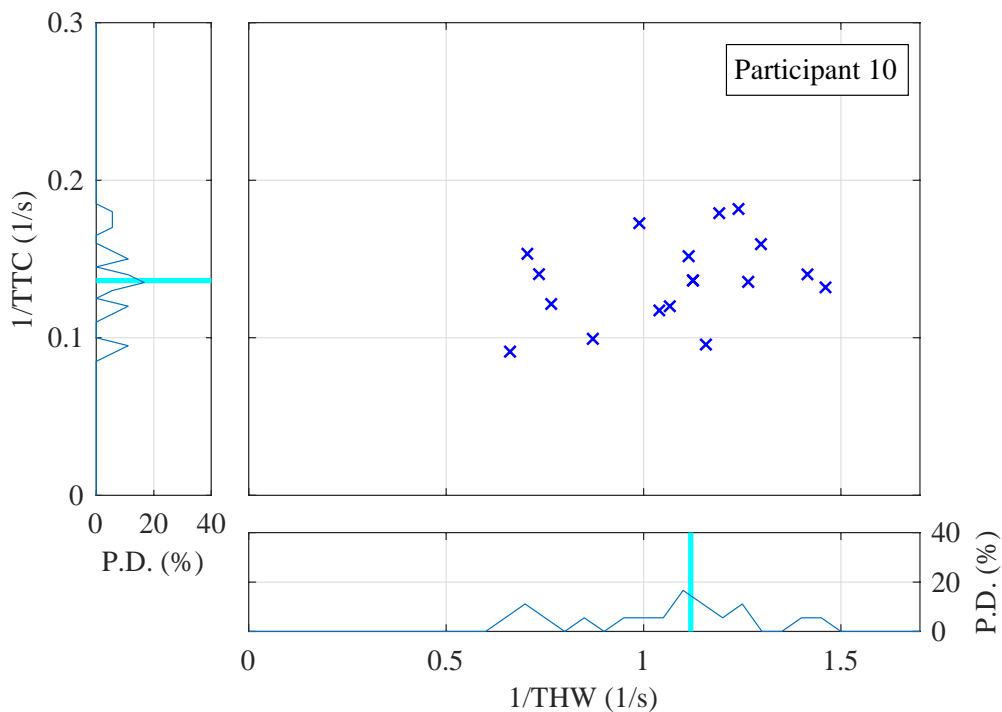


図 5-12 1/THW-1/TTC 位相平面におけるブレーキ操作特性 (Participant 10)

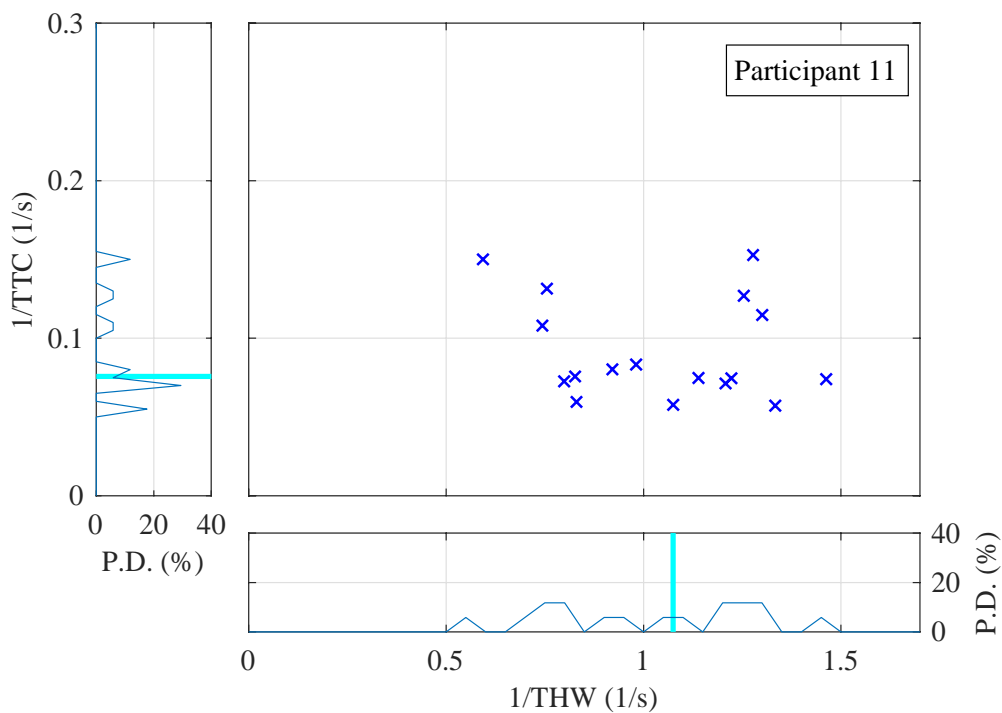


図 5-13  $1/THW$ - $1/TTC$  位相平面におけるブレーキ操作特性 (Participant 11)

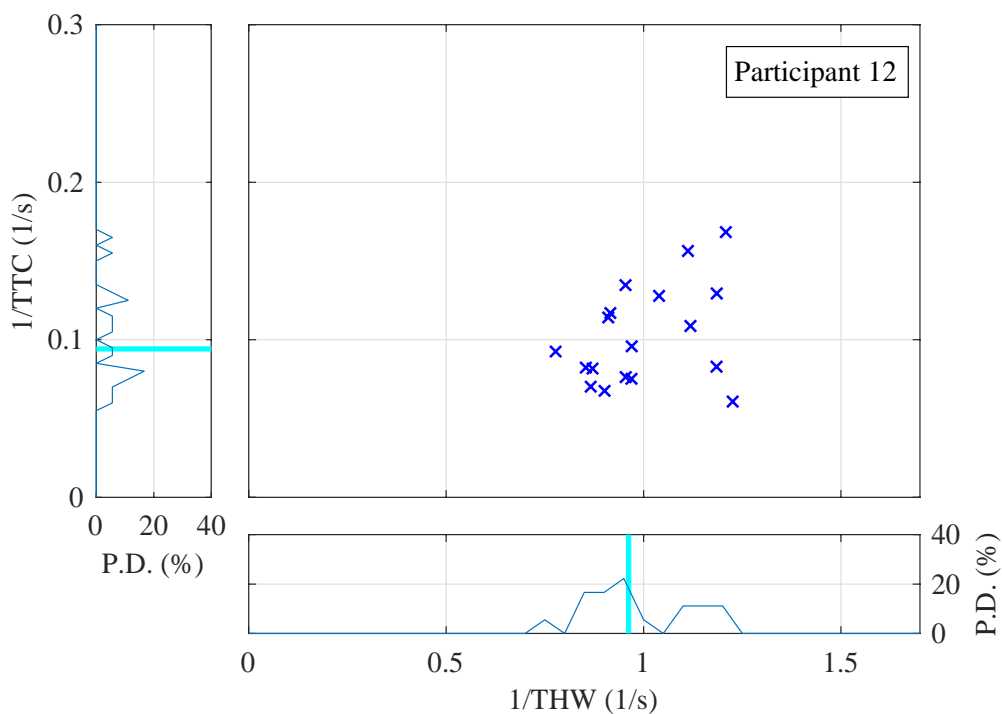


図 5-14  $1/THW$ - $1/TTC$  位相平面におけるブレーキ操作特性 (Participant 12)

表 5-2 実験参加者ごとのブレーキ操作特性

実験参加者番号	1/THW (1/s)	1/TTC (1/s)	比率
1	0.70	0.08	8.81
2	0.46	0.09	5.10
3	0.71	0.11	6.28
4	0.52	0.07	7.63
5	0.79	0.08	10.33
6	0.52	0.09	5.98
7	0.66	0.10	6.34
8	0.32	0.06	4.97
9	0.67	0.09	7.70
10	1.08	0.15	7.06
11	0.83	0.08	10.35
12	0.95	0.11	8.56
平均	0.69	0.09	7.42

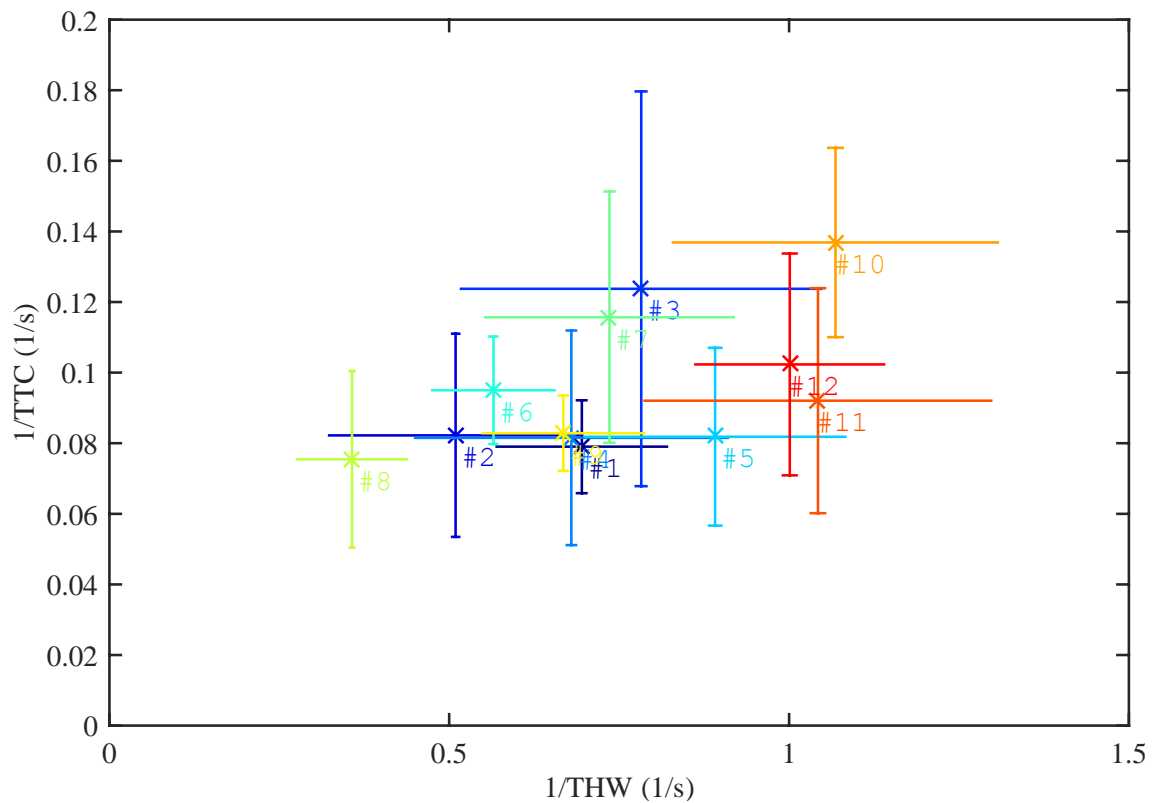


図 5-15 1/THW-1/TTC 位相平面におけるブレーキ操作特性, 実験参加者別

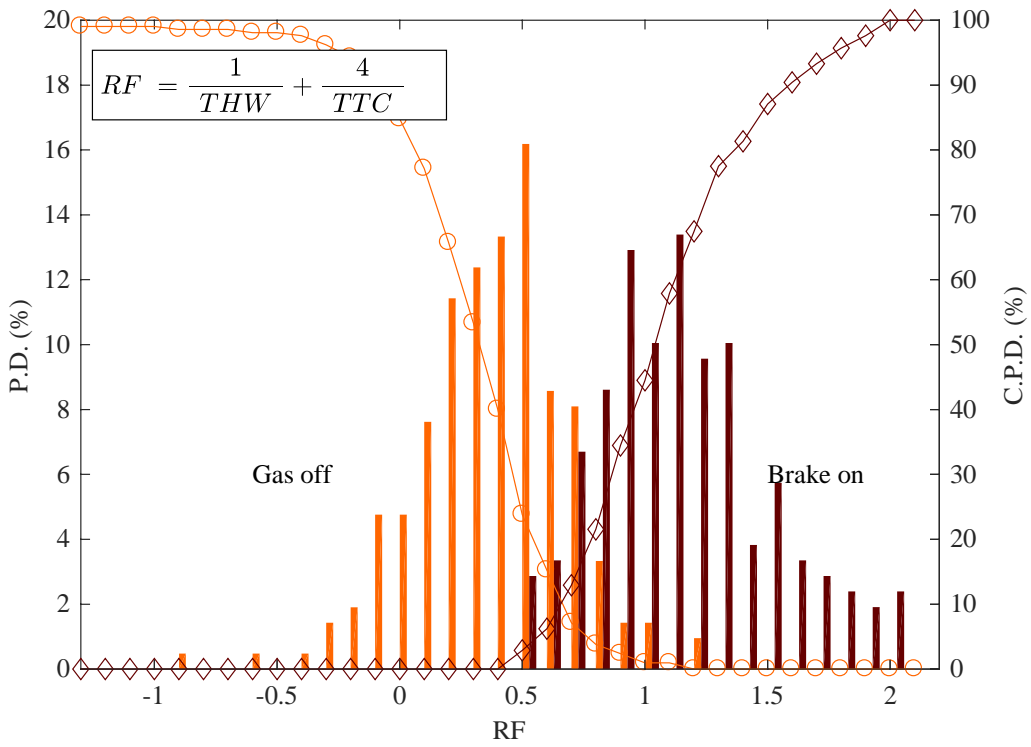


図 5-16 アクセルオフとブレーキオン判断タイミングにおける RF 値の分布

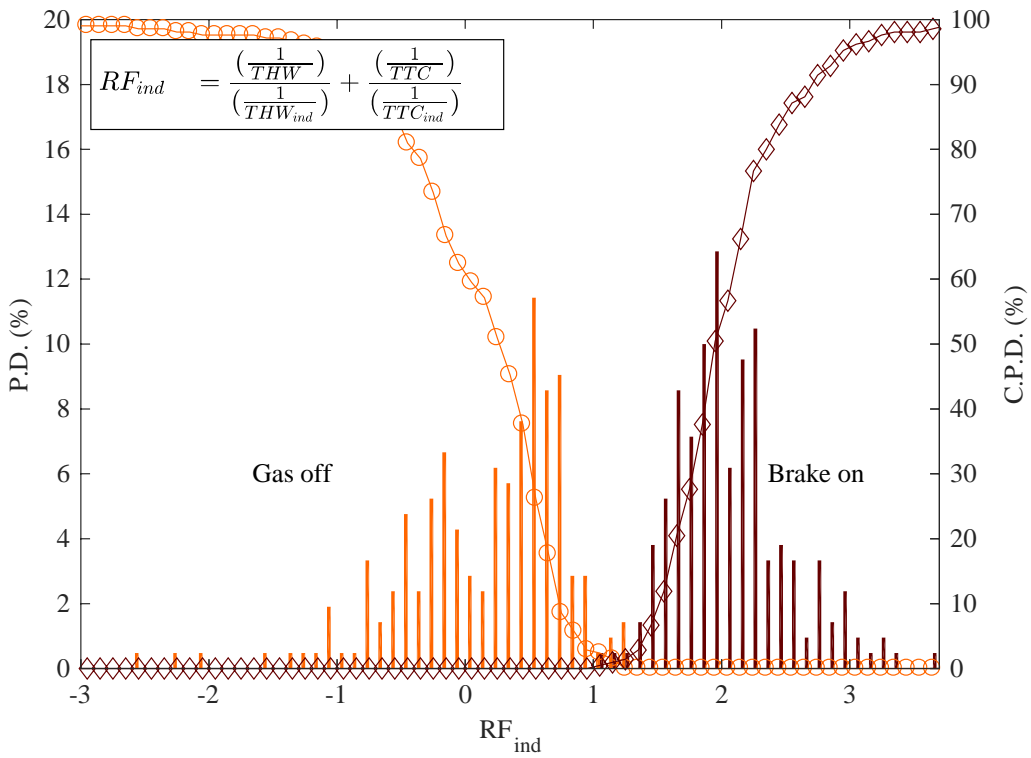


図 5-17 アクセルオフとブレーキオン判断タイミングにおける  $RF_{ind}$  値の分布

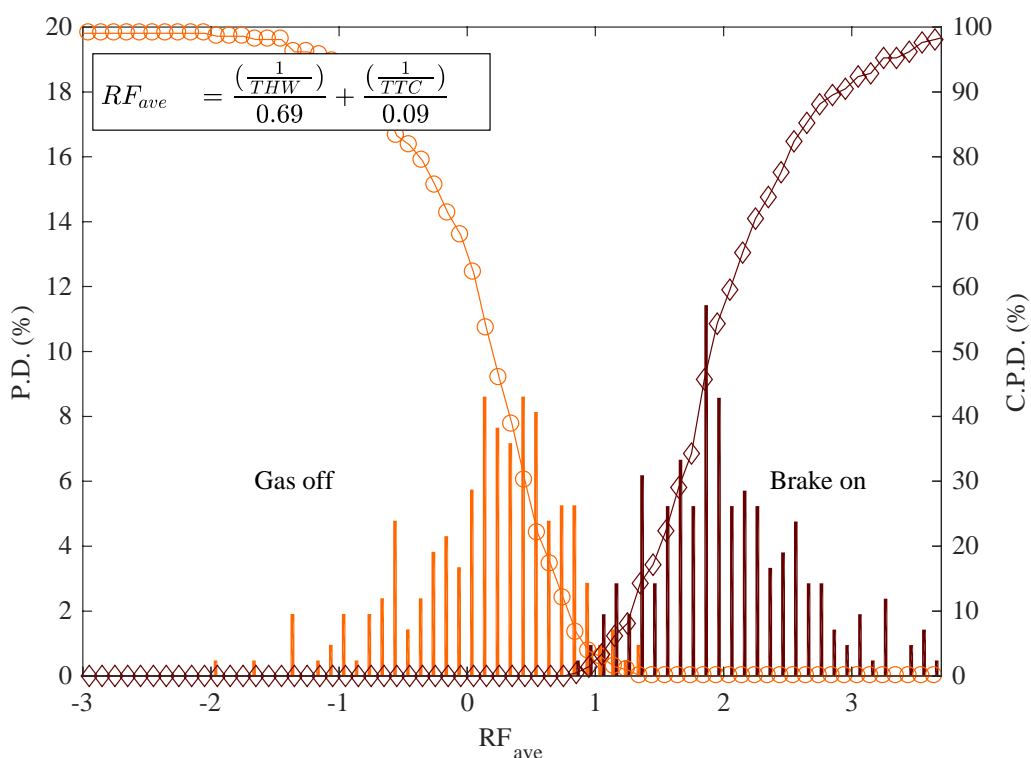


図 5-18 アクセルオフとブレーキオン判断タイミングにおける  $RF_{ave}$  値の分布

表 5-3 検出特性とその定義

		リスク値による推定	
		アクセルオフ	ブレーキオン
運転者の 実際の行動	アクセルオフ	True-negative	<b>False-positive (誤検出)</b>
	ブレーキオン	False-negative (非検出)	<b>True-positive (正検出)</b>

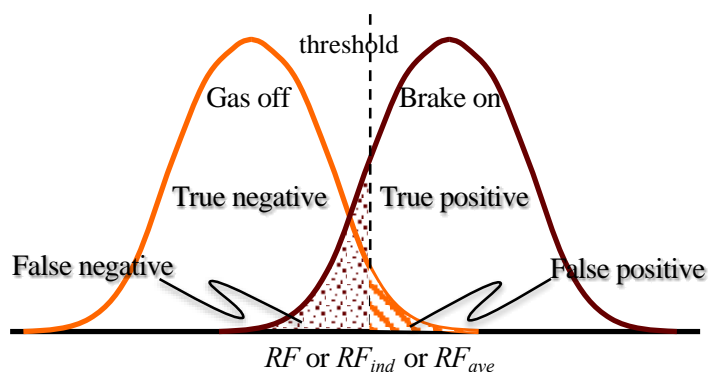
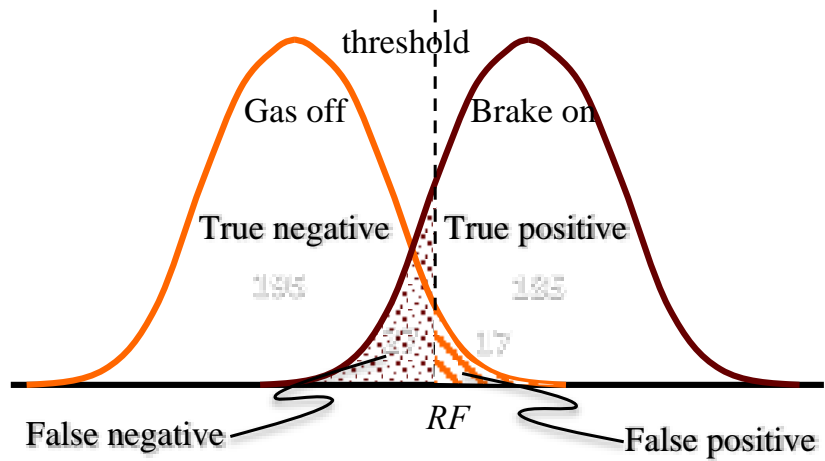
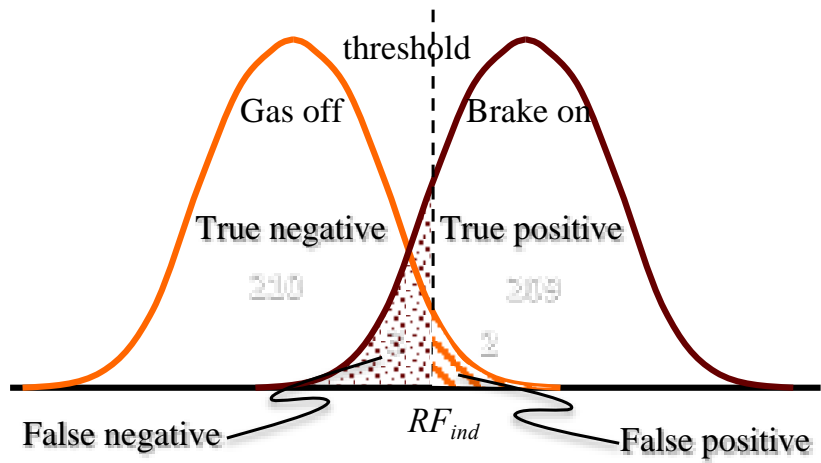


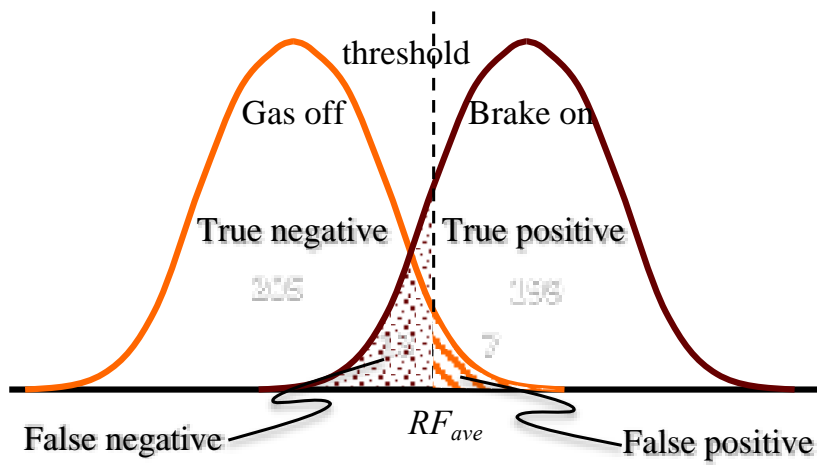
図 5-19 検出閾値と検出の種類



(a) RF



(b)  $RF_{ind}$



(c)  $RF_{ave}$

図 5-20 各評価指標における検出件数



表 5-4 アクセルオフ, ブレーキオンの分別性能

	正検出率	誤検出率
$RF$	87.3 %	8.4 %
$RF_{ind}$	98.6 %	0.9 %
$RF_{ave}$	93.9 %	3.4 %

表 5-5 正検出, 誤検出の改善効果

	正検出率	誤検出率
$RF$ v.s. $RF_{ind}$	+12.9 %	+89.2 %
$RF_{ave}$ v.s. $RF_{ind}$	+5.0 %	+73.5 %

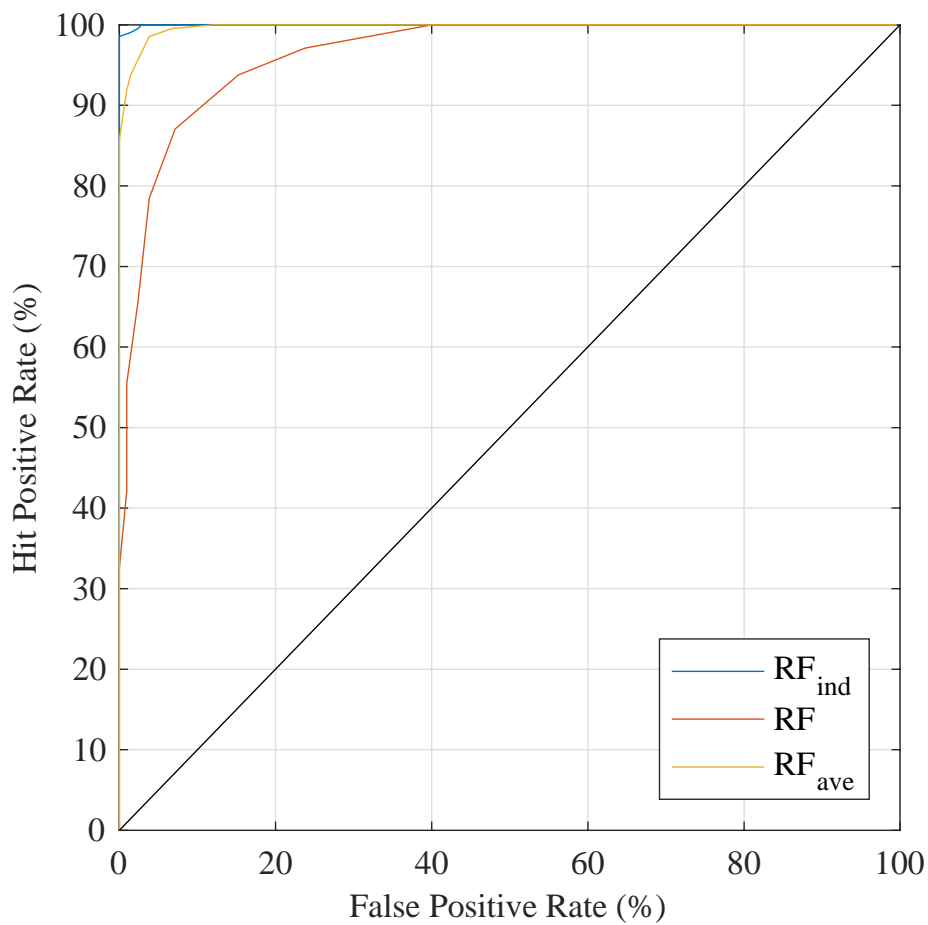


図 5-21 受信者動作特性曲線

## 5.6 考察

今回の実験で得られた結果について考察する。まず、ブレーキ操作判断特性について考察する。ブレーキ操作判断時の  $1/THW$  と  $1/TTC$  の分布特性に実験参加者間のばらつきがみられる (図 5-3 から図 5-14, 図 5-15)。ブレーキ操作時に観察された  $1/THW$  と  $1/TTC$  は、それぞれ独立した分布 (図 5-15) であり、また、両者の大きさの比率は実験参加者ごとに異なる (図 5-15, 表 5-2)。

ブレーキ操作判断時の 50%ile 値が個人適応型リスク式における運転者の運転行動特性を示す指標として用いられた。本研究で 50%ile 値を用いた理由は、ノイズの影響を配慮した上で日常的な運転者の運転行動を表現することでリスク式を個人適合する狙いがあった。個人の運転行動特性を表現する代表値は、リスク式の用途に応じて考慮すべきであると思われる。すなわち、運転者の運転操作の限界値のような指標であれば、95%ile 値が運転行動特性値として適切である可能性がある。

また、今回提案した  $RF_{ind}$  の妥当性を、アクセルオフとブレーキオンの特性から検証した。アクセルオフとブレーキオンを分別する閾値を設定し、ブレーキオンを検出目標とした場合に、検出性能は  $RF_{ind}$ ,  $RF_{ave}$ ,  $RF$  の順であった。これにより、個人の運転特性を考慮すると検出性能が向上することが明らかになった。なお、 $RF$  より  $RF_{ave}$  のほうが検出性能は高いため、 $RF$  の重みづけは運転状況を合わせた重みづけが設定されることが望ましい。

以上の結果より、個人適応型リスク式  $RF_{ind}$  の妥当性は高いと考えられる。また、アフォーダンスを適用した個人適応手法は適切であり、先行車接近場面におけるブレーキ操作に対して個人間差を超えた解析が可能になった。

ここで、従来式  $RF$  で用いられた各項の重みづけについて考察する。 $RF$  の重みは、それぞれ 1, 4 であった。これは、 $1/THW$ ,  $1/TTC$  では、一般的なブレーキタイミングがこの値に相当 (すなわち、 $THW=1$ ,  $TTC=4$ ) すると解釈できる。

図 5-21 の受信者動作特性曲線では、一般的な検出性能特性と同様に、正検出率、誤検出の割合を閾値の設定で柔軟に設定できることがわかった。個人適応したリスク式は、検出性能の要件や目標に応じて、警報の報知や制御の設定に柔軟に対応できると思われる。

## 5.7 結言

運転者の運転感覚に、より合致した先行車追従時の RF を構築するため、運転者の運転行動特性の代表値としてブレーキ操作特性で走行環境指標を正規化する、個人適応型リスク式  $RF_{ind}$  を提案した。この  $RF_{ind}$  の妥当性を検証するため、DS 実験で従来の RF、平均値に基づく  $RF_{ave}$  と比較した結果、他 2 つの指標と比べて  $RF_{ind}$  はアクセルオフとブレーキオンをうまく分別できることがわかった。これにより、リスク式の 2 つの指標である  $1/THW$  と  $1/TTC$  の感度調整を行うことで、運転者の個々の運転行動特性に適応していることが示唆された。

本章では、個人適合するリスク式の構築方法を確立することが狙いであるため、走行場面の再現性の高い DS 実験で行った。本章における DS 実験は実験参加者が限定的であり、DS で設計したシナリオで  $RF_{ind}$  の妥当性を検証した。 $RF_{ind}$  のより実用的な可能性を検証するためには、リアルワールドにおける検証が必要である。次章では、 $RF_{ind}$  の有用性を、リアルワールドデータを用いて検証する。

## 6 個人適応型リスク式の実走行環境への適用

### 6.1 緒言

第5章で個人適応型リスク式  $RF_{ind}$  を提案し、DS 実験で妥当性の検証を行った。 $RF_{ind}$  は、個人間差を超えた評価が可能なリスク式であるが、前章では、実験参加者は限定されていた。そこで、個人適応型リスク式の実現可能性を確認するためには、多様な運転者、様々な運転環境が含まれるリアルワールドにおける検証が必要である。そこで本章では、リアルワールドにおける運転者 50 名の走行データを用いて、 $RF_{ind}$  の有用性を確認する。

### 6.2 概要

$RF_{ind}$  は、先行車追従接近時の運転者の主観的リスク感を運転者の個人特性 ( $1/THW_{ind}$  と  $1/TTC_{ind}$ ) と環境特性 ( $1/THW$  と  $1/TTC$ ) の両者を用いて表現される。

本研究では、ナチュラルスティックな運転行動データベース (Naturalistic Driving Database, 以下 NDD) を用いて、先行車追従場面におけるブレーキ操作特性を運転者ごとに明らかにし、 $RF_{ind}$  の妥当性を検証した。本章で用いた NDD は、SHRP2 NDS (SHRP2 の詳細は、次節 6.3) のサブセットであり、7500 トリップ (50 名の実験参加者、各実験参加者 150 トリップ) を有する。これらのトリップから、アクセルペダルからブレーキペダルへの踏み替え操作を解析対象として 972 回の抽出した。

このブレーキ操作のデータを用いて、 $RF_{ind}$  のパラメータを実験参加者ごとに同定し、 $RF_{ind}$  値によるブレーキオンの正検出性能を確認した。その結果、正検出率が 92.0%，誤検出率が 8.0% であった。これは、従来式の RF と比較すると、個人適合することにより正検出率が 4%，誤検出率が 30% の向上がみられた。

### 6.3 ナチュラルスティックな運転行動データ

個人適応型リスク式の妥当性を検証するためには、多様な運転者、様々な走行環境、かつ、長時間の走行データが必要であると考えた。NDD は、あらゆる種類の運転場面や様々な運転者状態を含み、長時間の運転行動が含まれている。

本解析には、SHRP2 NDS (the Second Highway Research Program Naturalistic Driving Study) (Perez et al., 2016) を用いた。SHRP2 NDS は、米国運輸省 (US DOT) が推進した第 2 期戦略的高速道路研究プログラム (the Second Highway Research Program) の一環で計測された運転

行動データベースである。

SHRP2 NDS の計測は 2010 年から 2013 年にかけて行われ、米国 6 箇所（ワシントン州シアトル、インディア州ブルーミントン、ニューヨーク州バッファロー、ペンシルベニア州ステートカレッジ、ノースキャロライナ州ダーラム、フロリダ州タンパ）で行われた。

計測に用いた車両は、実験参加者が所有し、日常的に使用する車両であり、DAS（データ計測システム、Data Acquisition System）を搭載されている。

SHRP2 NDS の運転行動データベースの規模は、2019 年現在で世界最大である。3500 人以上の実験参加者の日常の運転が常時記録され、走行距離 48,000,000 km（30 million mile）に及ぶデータが収蔵されている（データ総量として 2 ペタバイト）。実験参加者の年齢は、免許取得直後の 16 歳から 90 歳以上までカバーしている。各実験参加者の実験参加期間は 1～2 年間であり、実験参加期間中にデータはイグニッションオンから常時記録される。計測で使われている車両が、実験参加者として登録されていない運転者が運転した場合は、データは削除される。

SHRP2 NDS には、以下のデータが計測されている。

- 時系列データ（車両の加速度、ターンシグナル、速度、ブレーキペダル、ヘッドライトなど）
- ビデオデータ（車両前方、車両後方、車室内、顔）
- 車両情報
- トリップ概要（各走行トリップの概要）
- 実験参加者の情報
- 地図情報とのマップマッチング（トリップの詳細な道路情報）
- イベント情報（クラッシュ、ニアクラッシュなどにおける交通環境の情報）

これらのデータベースは、安全運転、交通管制、物流などの分野で活用されることが期待されている。なお、SHRP2 NDS の概要に関しては、専用の Web サイト（<http://insight.shrp2nds.us>）に記載されており、登録をすれば、データを閲覧可能である。

### 6.4 データベースの分析対象

RF<sub>ind</sub> の妥当性を確認するため、前述した SHRP2 データベースのサブセットとして、RiskFeeling データベースを構築した。RiskFeeling データベースは、下記すべてに該当するデータを抽出した。

- ✓ 実験参加者の年齢 30-49 歳、合計 50 名
- ✓ 1 回の運転走行時間が 20 分以上あるトリップ

✓ 上記のトリップをひとりあたり 150 トリップ

結果, 合計 7500 トリップ (走行距離 230,000 km, 走行時間 4200 時間) が抽出された.

図 6-1 に, SHRP2NDS と RiskFeeling データベースの概念図を示す.

本研究は, バージニア工科大学 研究倫理委員会の承認を受けて実施した (IRB 承認番号:15-937).



図 6-1 SHRP2 データベースと RiskFeeling データベースの概要

## 6.5 先行車追従場面の抽出

第 5 章の DS 実験における運転場面を想定し, 先行車追従場面から接近場面に切り替わる状態におけるアクセルオフからブレーキオンのペダル踏み替え操作に着目した. DS 実験と同等の運転場面を抽出するため, 以下 4 つを含む追従場面が NDD のデータベースから抽出された.

- ✓ 同一先行車に 20 秒以上の追従
- ✓ 先行車に接近・離脱の追従を 1 サイクル以上繰り返し行っている追従
- ✓ THW が少なくとも 4 秒以下になる追従
- ✓ ブレーキオンを含む接近場面が含まれる追従

アクセルオフとブレーキオンした際の  $1/THW$  と  $1/TTC$  は, 運転者のペダル操作と車載したレーダーデータから抽出した. 本研究における重要な観点は, 個人間差の特性を特定し, 個人適応型リスク式の妥当性を検証することにある. ナチュラリスティックな運転行動データには多様な走行環境が含まれるため, 今回, 個人の運転行動分布特性の中心部分 ( $1/THW$  と  $1/TTC$  が各実験参加者の 10-90%ile に含まれるデータ) を用いた. これより, NDD の特異的なデータは排除され, 各実験参加者の中心的なデータが利用可能になる. これらのデータを用いて, RF 値と,  $RF_{ind}$  値を算出した. RF 値は,  $1/THW$  と  $1/TTC$  の線形和であり, 重みはそれぞれ, 1 と 4 に設定した.  $RF_{ind}$  値は, 先行車接近時のブレーキオン時の各実験参加者の  $1/THW$  と  $1/TTC$  の 50%ile 値を各実験参加者の個人特性として, RF の 2 つの項を正規化し算出した.

2 つのリスク式 RF と  $RF_{ind}$  は, 運転における運転者主観的なリスク感を表す尺度である.

もし、この尺度の精度が高ければ、アクセルオフとブレーキオンの時間的な分離を特定できるものと考えられる。

## 6.6 結果

図 6-2 に本解析で抽出された、各実験参加者のアクセルオフからブレーキオンへの踏み替え (GOBO: transition from Gas Off to Brake On) 回数を示す。各実験参加者のデータから抽出された踏み替え回数 (各実験参加者の踏み替え特性の 10-90%ile 値の相当) は 972 回に及び、50 名の実験参加者は 3-65 回の踏み替え (平均 29.9 回) が抽出された。図 6-3 から図 6-6 にブレーキ操作タイミングを  $1/TTC-1/THW$  平面上に実験参加者ごと (合計 50 名分) に示す。各図中の左、下は  $1/TTC$  と  $1/THW$  の頻度分布を示し、太線はそれぞれの 50 %ile 値を示す。図中の緑色の枠は、10-90 %ile 値の範囲を示し、この枠内のデータが分析に利用された。表 6-1 にブレーキタイミングの 50 %ile 値における  $1/THW$  と  $1/TTC$ 、両者の比率を示す。 $1/THW$  の範囲は 0.29-0.54 (平均 0.39)、 $1/TTC$  の範囲は 0.06-0.16 (平均 0.10) であり、それぞれ 2 倍近い差がみられる。また、 $1/THW$  と  $1/TTC$  の比率は、2.74-6.59 であり、平均は 4.08 であった。図 6-7 に、追従接近場面における実験参加者ごとにブレーキオンの 50%ile 値を  $1/THW$  と  $1/TTC$  上に示す。 $1/THW$  と  $1/TTC$  それぞれは、運転者のリスク感そのものを表すため、図中の左下に位置する実験参加者 ( $1/THW=0.32, 1/TTC=0.07$ ) はリスクに対して保守的な運転者であり、また、右上に位置する実験参加者 ( $1/THW=0.54, 1/TTC=0.16$ ) は、スポーティーな運転者と考えられる。また、それぞれのプロット値は、 $RF_{ind}$  定式化の正規化に用いられる値 ( $1/THW_{ind}$  と  $1/TTC_{ind}$ ) である。

図 6-8 に、従来のリスク式  $RF$  と個人適応した  $RF_{ind}$  の、アクセルオフとブレーキの分離性能について示す。なお、アクセルオフの累積頻度分布は、0 % と 100 % を反転してある。第 5 章と同様にアクセルオフとブレーキオンの踏み替えの閾値は、2つの累積頻度分布の交点とし、この交点におけるアクセルオフとブレーキオンの分離性能を調べた。 $RF$  と  $RF_{ind}$  の閾値は、それぞれ 0.63 と 1.61 であった。その結果、 $RF$  において、ブレーキオンの正検出率は 88.5 % であり、誤検出は 11.5 % であった。また、 $RF_{ind}$  においては、正検出 92.0 %、誤検出 8.0 % であった。表 6-2 に、それぞれの分離性能と向上代を示す。

図 6-9 に  $RF$  と  $RF_{ind}$  の受信者動作特性曲線を示す。 $RF_{ind}$  は、 $RF$  比べると総じて、高い正検出率と低い誤検出率を有し、分離性能が良いことが示されている。すなわち、リアルワールドにおいても  $RF_{ind}$  は、実験参加者のアクセルオフからブレーキオンへの踏み替えタイミングを  $RF$  より正確に検出することができるといえる。

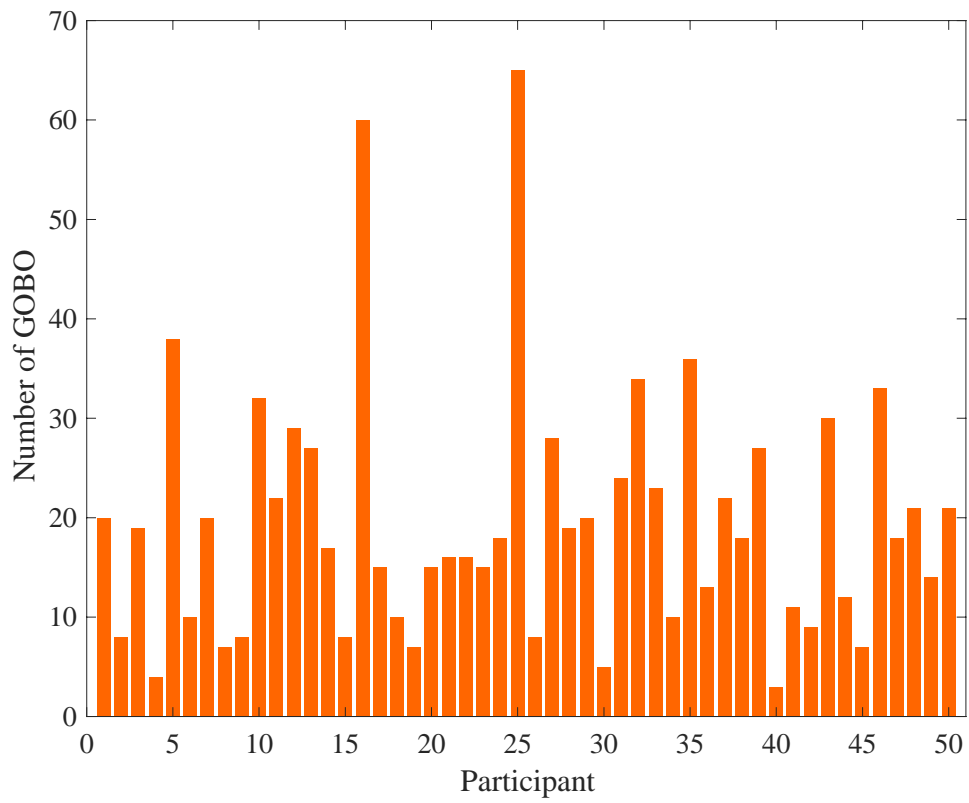


図 6-2 各実験参加者のアクセルオフからブレーキオンへの踏み替え回数



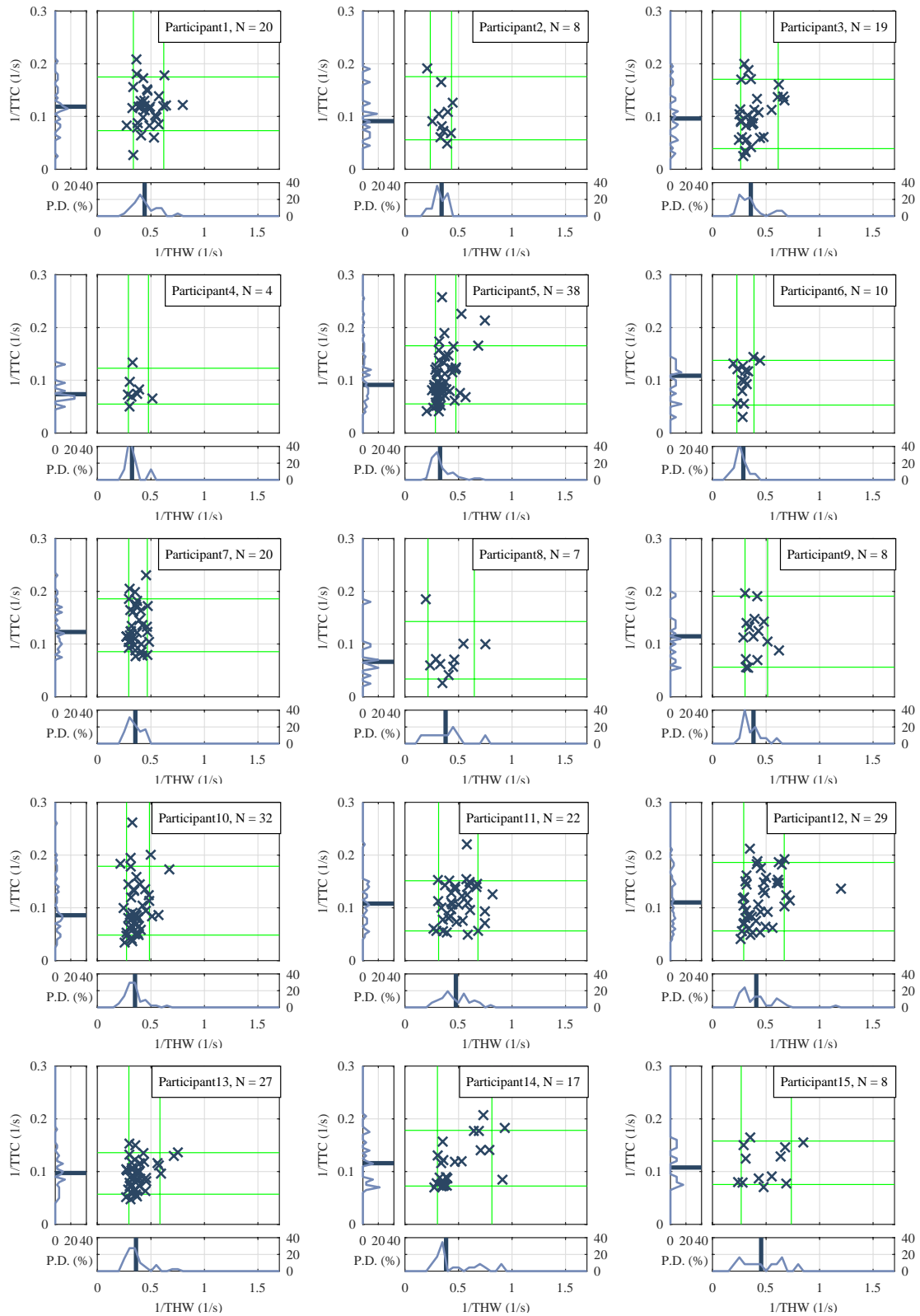


図 6-3 実験参加者ごとのブレーキ操作特性 (Participant1~Participant15)

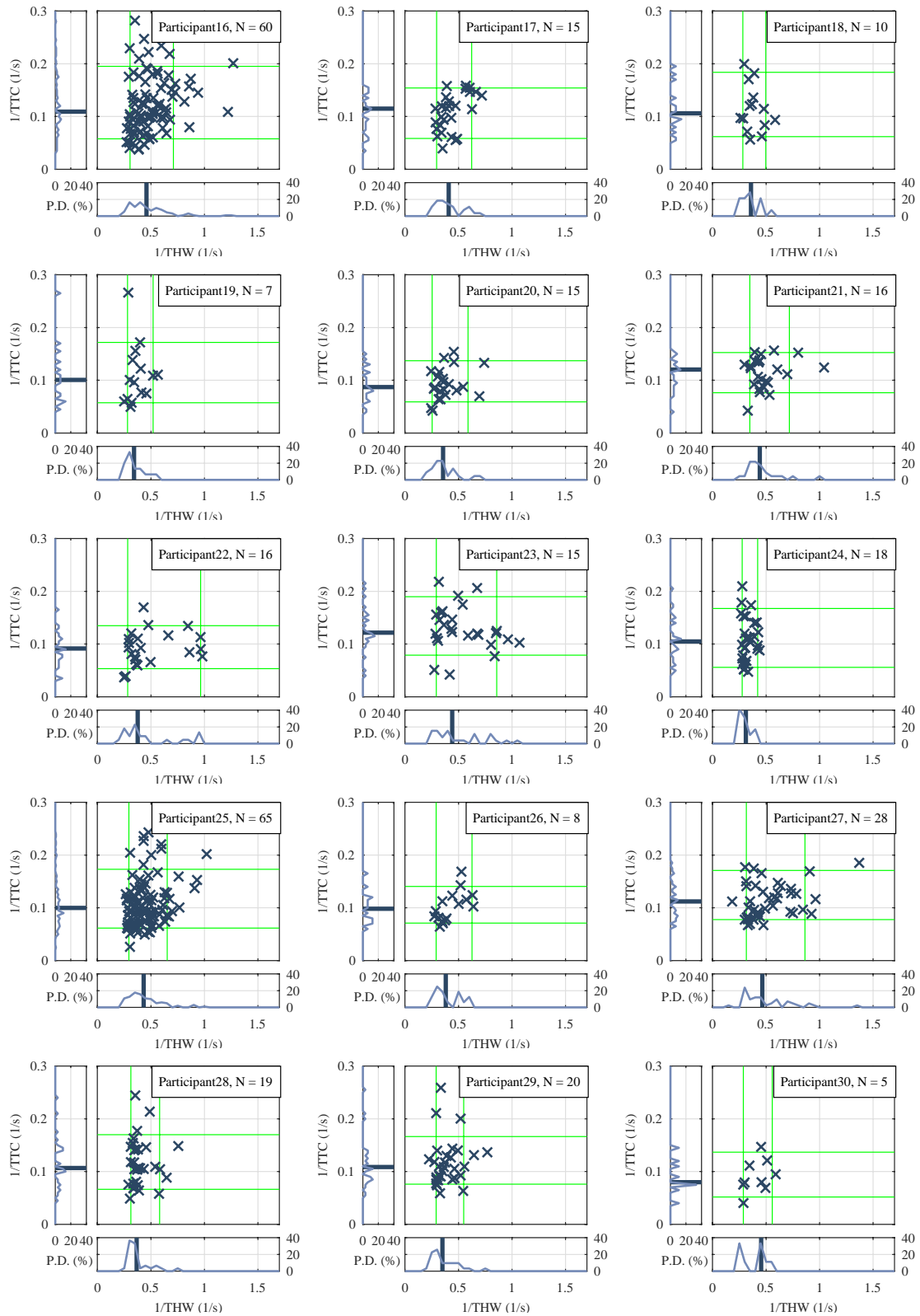


図 6-4 実験参加者ごとのブレーキ操作特性 (Participant16~Participant30)

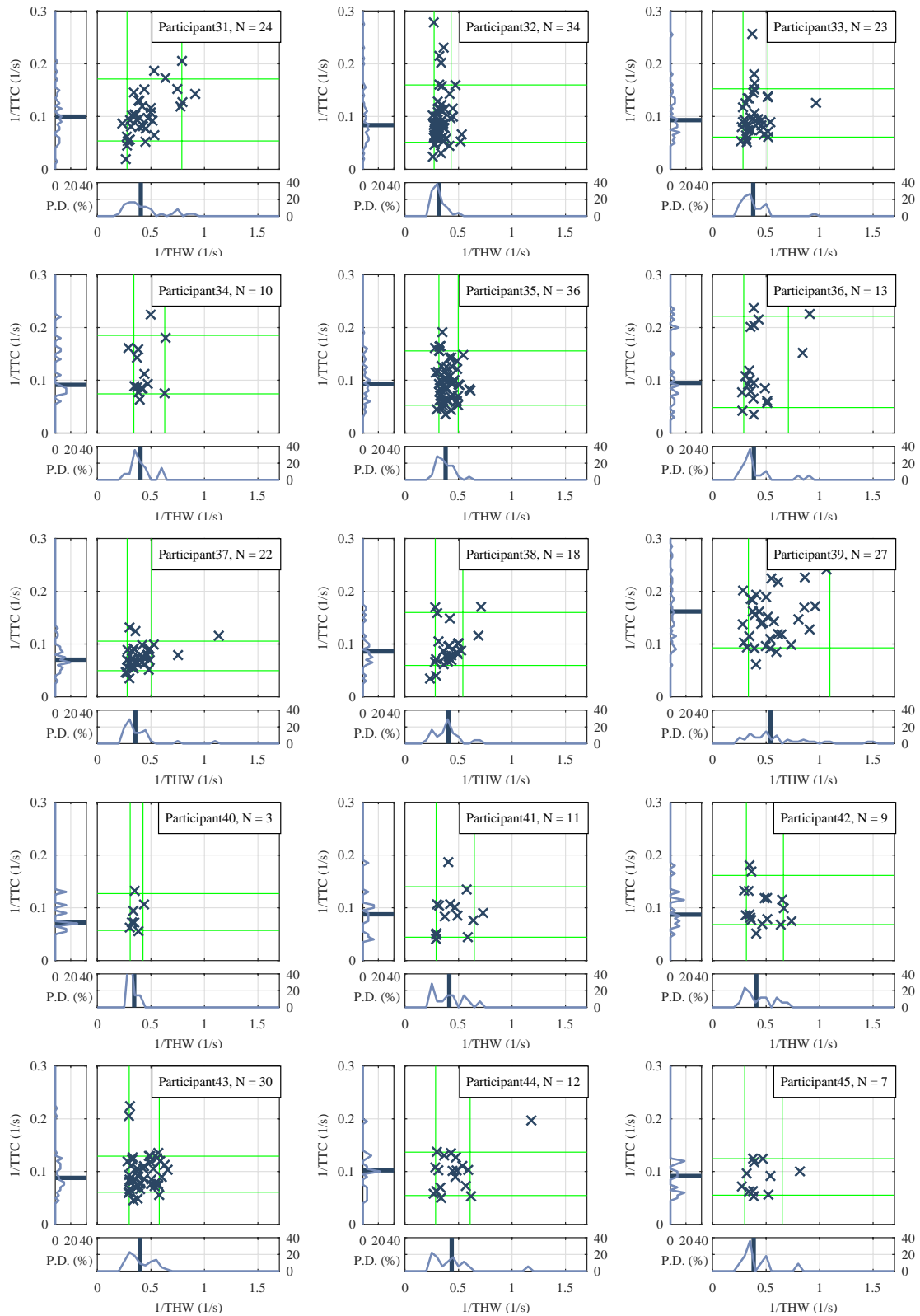


図 6-5 実験参加者ごとのブレーキ操作特性 (Participant31~Participant45)

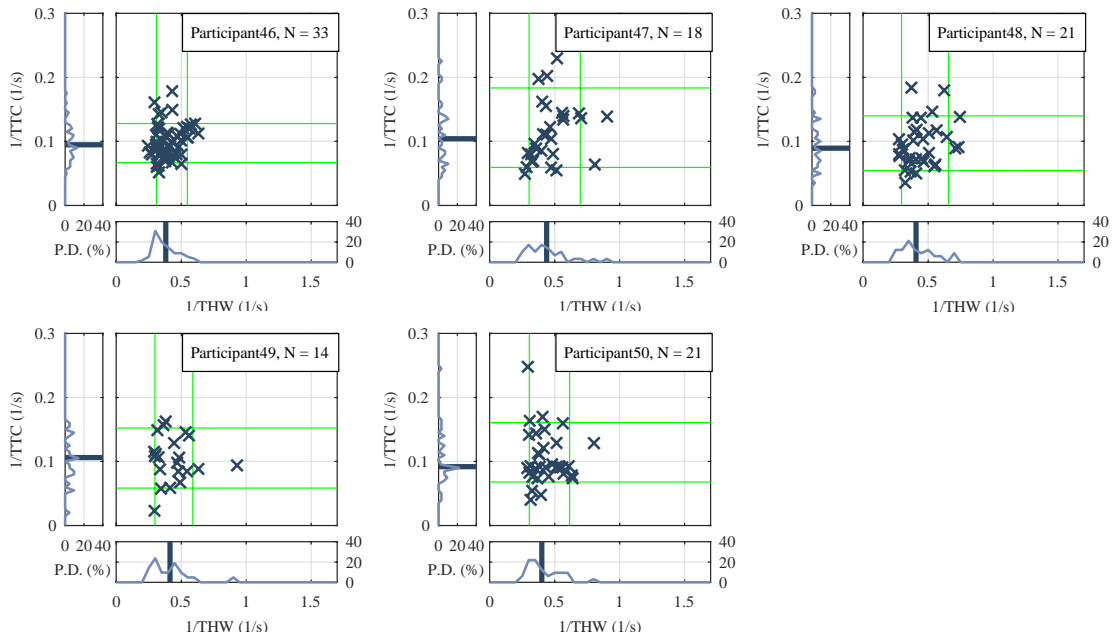


図 6-6 実験参加者ごとのブレーキ操作特性 (Participant46~Participant50)

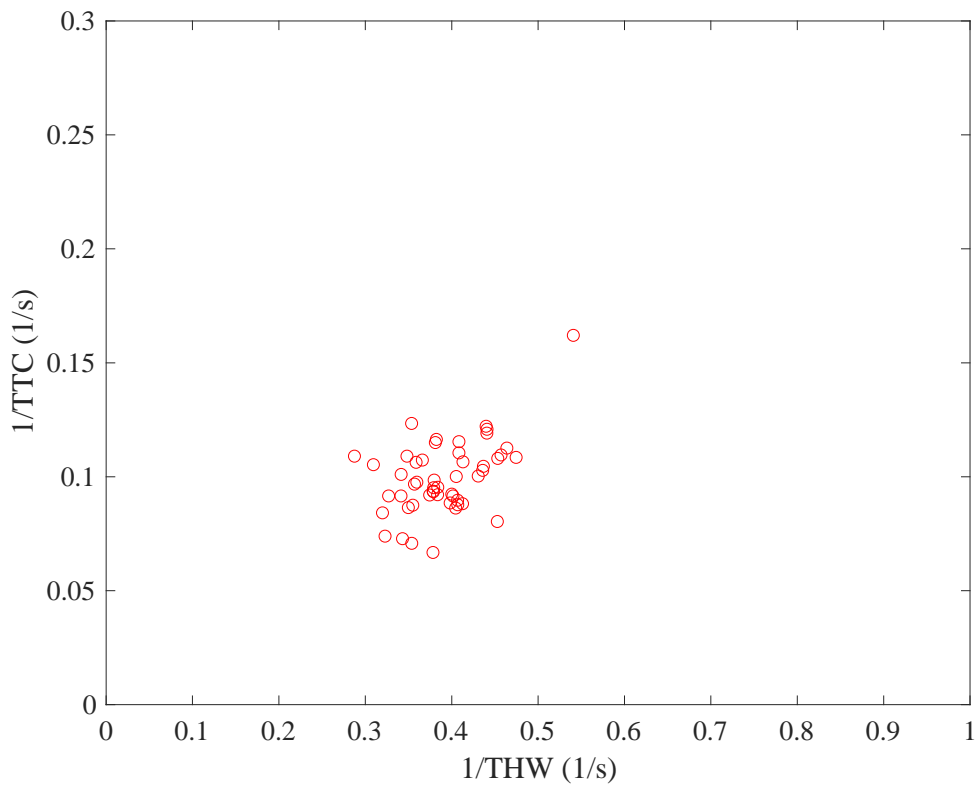
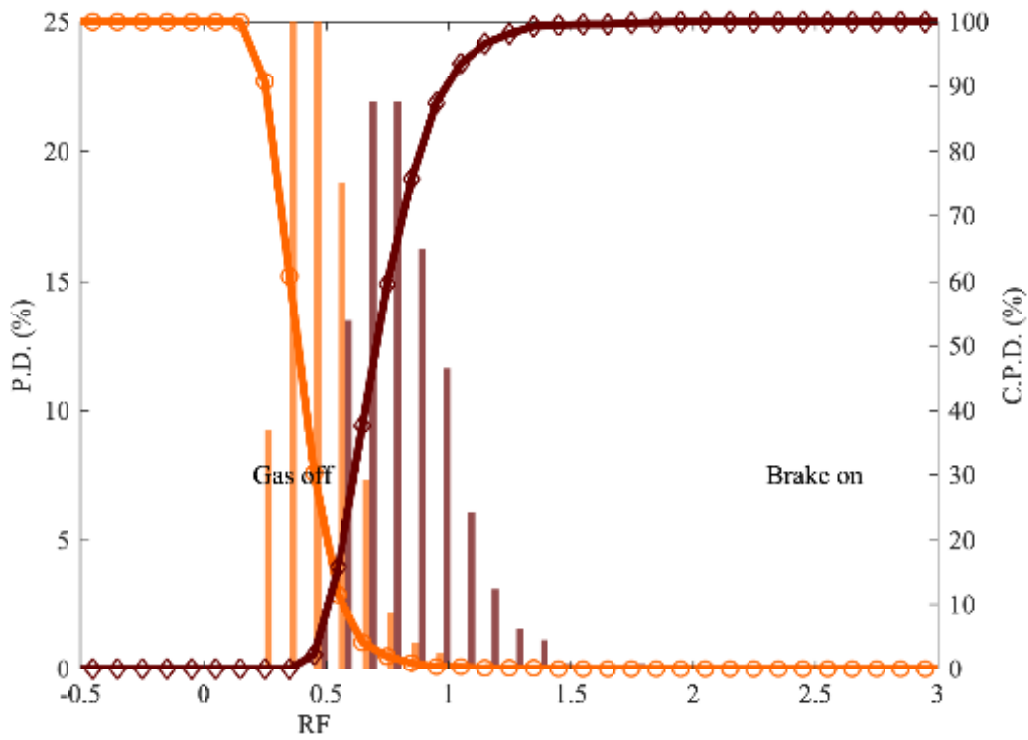


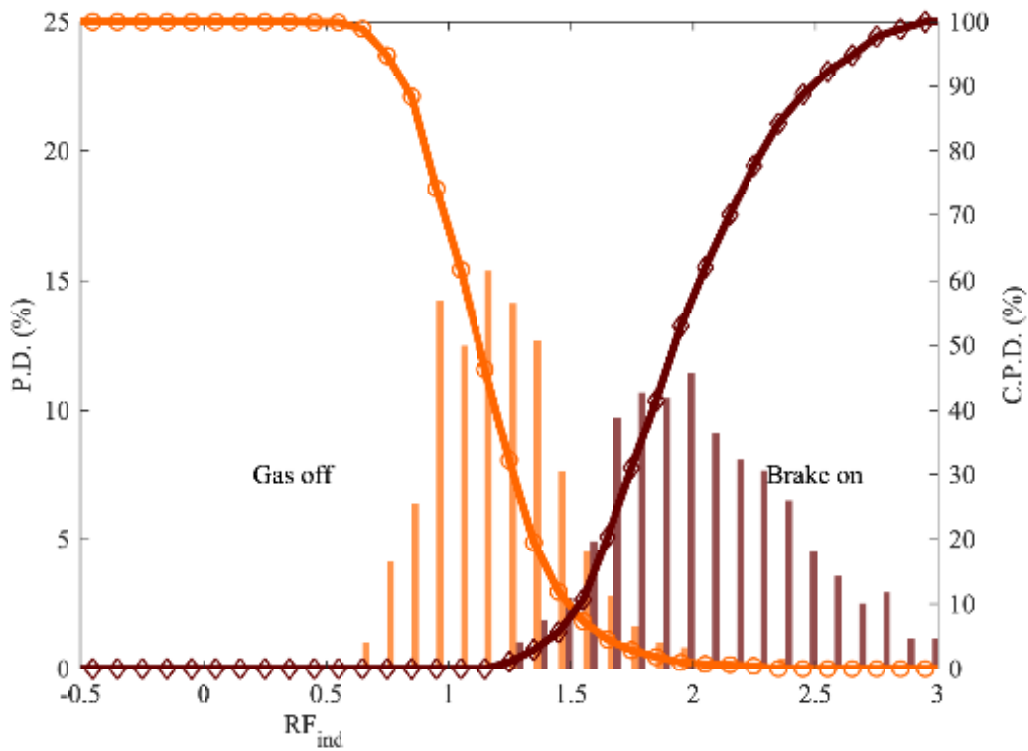
図 6-7 各実験参加者のブレーキ操作特性 (全実験参加者, 50%ile 値)

表 6-1 実験参加者ごとの 1/THW と 1/TTC の 50%ile 値とその比率

Participiant	1/THW	1/TTC	Rate
1	0.45	0.12	3.82
2	0.34	0.09	3.94
3	0.37	0.09	4.11
4	0.35	0.08	4.40
5	0.33	0.09	3.49
6	0.29	0.10	2.90
7	0.35	0.13	2.74
8	0.41	0.06	6.59
9	0.39	0.13	3.01
10	0.36	0.08	4.31
11	0.48	0.11	4.33
12	0.41	0.11	3.87
13	0.37	0.09	4.20
14	0.38	0.12	3.24
15	0.49	0.11	4.57
16	0.46	0.11	4.28
17	0.38	0.12	3.29
18	0.37	0.12	3.20
19	0.36	0.10	3.53
20	0.35	0.09	4.09
21	0.44	0.11	4.04
22	0.37	0.09	3.96
23	0.44	0.12	3.59
24	0.31	0.11	2.89
25	0.43	0.10	4.30
26	0.38	0.09	4.04
27	0.48	0.11	4.45
28	0.35	0.11	3.30
29	0.36	0.10	3.68
30	0.46	0.08	5.73
31	0.39	0.10	3.94
32	0.32	0.08	3.82
33	0.38	0.09	4.05
34	0.40	0.09	4.51
35	0.39	0.09	4.20
36	0.39	0.09	4.05
37	0.35	0.07	5.04
38	0.41	0.09	4.73
39	0.54	0.16	3.35
40	0.34	0.07	4.75
41	0.41	0.09	4.72
42	0.41	0.09	4.68
43	0.40	0.09	4.53
44	0.44	0.10	4.27
45	0.38	0.09	4.20
46	0.38	0.09	4.01
47	0.44	0.10	4.20
48	0.41	0.09	4.57
49	0.41	0.11	3.90
50	0.40	0.09	4.36
平均	0.39	0.10	4.08



a) RF



b)  $RF_{ind}$

図 6-8 アクセルオフとブレーキオンの分離特性

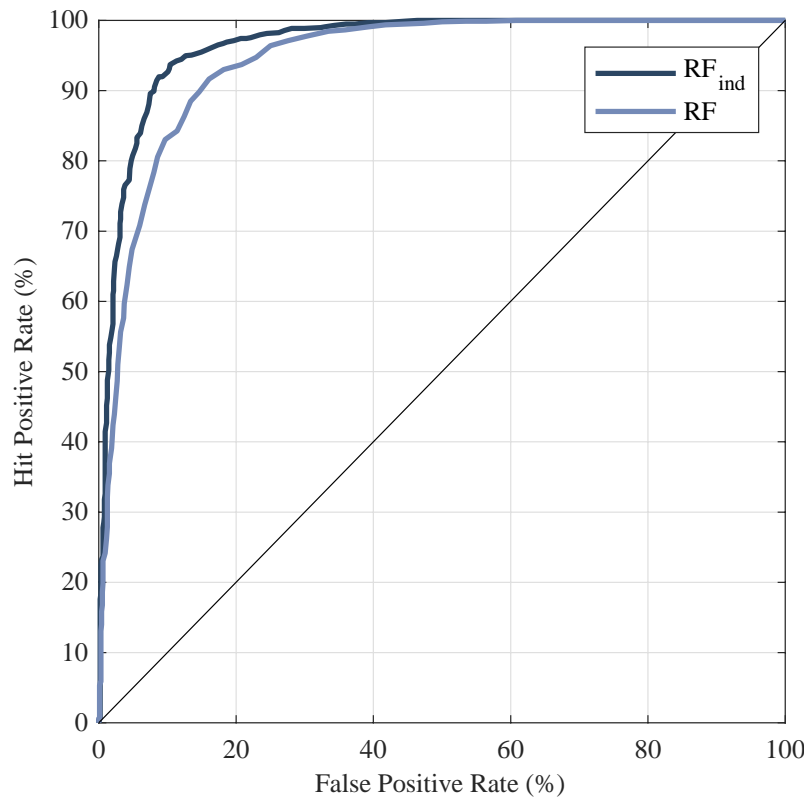


図 6-9 受信者動作特性曲線 (ROC) における分離特性

表 6-2 RFとRF<sub>ind</sub>の分離性能

	正検出率	誤検出率
RF	88.5 %	11.5 %
RF <sub>ind</sub>	92.0 %	8.0 %
向上代	+4.0 %	+30.4 %

## 6.7 考察

リアルワールドにおいて、ブレーキ特性を調べた結果、 $1/THW$  と  $1/TTC$  でそれぞれおよそ2倍。これは、リスク値でも同様に2倍の差があり、 $1/THW$  と  $1/TTC$  の重みも異なることから個人適応が必要であると考えられる。例えば、保守的な運転者が運転支援システムを使用した場合、もし、ADAS がスポーティーな運転者の特性を反映していた場合に、保守的な運転者の通常の運転体験の2倍のリスク感に晒されることになる。

ACCなどの車間距離設定は、THWをパラメータに設定されていることが多いと考えられる。その設定値は、3段階、7段階、無段階と自動車メーカーや車種によって異なる。運転者のリスク感度の弁別閾 (JND)<sup>9</sup> が分かれば、NDSから得られた $1/THW$ の設定幅の中で、何段階の設定値があれば実用上十分であるかが設計要件として定義可能である。この際、運転者のリスク感は、 $1/THW$ に依存するため(本論文3.2)、 $1/THW$ で定義されるリスク感に応じて設定することが可能である。

次に第5章のDS実験の個人間差について比較する。DS実験では、 $1/THW$ の範囲は0.32-1.08(平均0.69)、 $1/TTC$ の範囲は0.06-0.15(平均0.09)であり、また、両者の比率は、4.97-10.35(平均7.42)である(表5-2)。また、一方で、NDDでは、 $1/THW$ の範囲は0.29-0.54(平均0.39)、 $1/TTC$ の範囲は0.06-0.16(平均0.10)であり、また、両者の比率は、2.74-6.59(平均4.08)である(表6-1)。第5章のDS実験と第6章のNDDを用いた解析では、実験参加者の特性(大学生中心と一般の運転者)や走行環境(DSによる決められた先行車のシナリオと、実験参加者が所有する車で生活場面における運転)が明らかに異なる。それにも関わらず、DSとNDDのブレーキ操作における $1/TTC$ の範囲と平均とは同等である。一方で、 $1/THW$ の範囲は、最小値(車間時間が長い運転者)は変わらないが、DS実験において相対的に $1/THW$ が短い運転者が多いことがわかった。DS実験の $1/THW$ の平均値(0.69)は、NDDの最大値(0.54)をもつ運転者よりも大きい。これより、ブレーキ操作判断における $1/TTC$ の運転者の分布は、実験参加者の属性や走行環境による差が小さいことが示唆される。一方で、ブレーキ操作判断における $1/THW$ の運転者の分布は、実験参加者の属性や走行環境に影響を受けることが考えられる。特に、DS実験では先行車が決められた走行パターンで走行するため、実験参加者が先行車の将来の挙動を予見しやすい。一方で、NDDは走行環境の挙動が予見しにくく、また、安全マージンをDS実験より相対的に大きくとっている可能性がある。

---

<sup>9</sup> ここにおける弁別閾は $1/THW$ の知覚感度ではなく、リスク感度としての弁別閾のことである。知覚として差異がみられても、リスクの変動幅として許容できる範囲であれば設定値として同一の車間設定でよいが、運転者がリスク感として許容できない設置値であれば、設定値をわける必要がある。



本章における結果は、この行動可否に関する個人間差の問題に関連する個人適合方法に貢献する成果であると考えられる。受信者動作特性曲線では、 $RF_{ind}$  は、運転者がいつアクセルペダルを離し、いつブレーキペダルを踏むかについて、よりよく分別することを示した。 $RF_{ind}$  の性能は、ブレーキオンの正検出率は 92.0 %、誤検出率は 8.0 % であり、 $RF$  を用いた場合に比べて、向上した。この個人適応型リスク式  $RF_{ind}$  を運転支援システムに適用した場合に、より運転者の感覚に合致した車両挙動が期待できる。

また、本章における  $NDS$  を用いたアクセルオフとブレーキオンの分離性能は、第5章の  $DS$  を使った結果と比べると、精度が高くないことがわかった。これは、Brackstone の研究 (Brackstone, Waterson & McDonald, 2009) で示されているように  $NDS$  では運転条件や走行環境の変化が大きく変わることが要因と考えられる。本研究では、各実験参加者の運転特性の分布の中心部分を用いているが、全ての結果を使った場合は、さらに多様な運転条件（走行条件や運転者の運転状態）を含むことから、分離性能は悪化すると思われる。そのため、多様な運転条件で本手法を活用するためには、多様な運転条件を分類する手法（例えば、運転場面や運転者状態を分類、または、分離する手法）が必要になるであろう。

### 6.8 結言

個人に適応したリスク式の有用性を検証するために、より多くの実験参加者データかつ様々な走行環境を含むナチュラルスティックな運転行動データを用いた。リアルワールドにおける、ブレーキ操作の個人間差は、 $1/THW$  の範囲は 0.29–0.54 (平均 0.39)、 $1/TTC$  の範囲は 0.06–0.16 (平均 0.10) あることがわかった。それぞれの指標で 2 倍近い差がみられる。個人適応型リスク式 ( $RF_{ind}$ ) の正検出率は 92.0 %、誤検出率は 8.0 %、 $RF$  と比較した向上代は、4.0 % と 30.4 % であった。以上により、個人適応型リスク式の有用性が検証できた。

## 7 統括的議論

### 7.1 本論文の概要

本研究では、「先行車追従・接近場面における運転者の知覚-行為システムに基づくリスク式の開発」に取り組んだ。最初に、先行車追従・接近場面における運転者の知覚の入力情報の特定 (1/THW と 1/TTC) を行い、それらの知覚特性を明らかにした上で、この知覚特性に基づくリスク式 (1/THW と 1/TTC の線形和) を構築した (第3章)。次に運転行動におけるリスク式の有効性の検証を試みた結果、1) 1/THW と 1/TTC の組み合わせであるリスク式は運転行動をうまく表現できることと、2) 運転行動に個人間差があり個人間差を考慮したリスク式が必要であることを明らかにした (第4章)。次に個人ごとの運転行動特性を反映させる個人適応型リスク式を構築し、その妥当性を DS 実験で検証した結果、個人適合することによりアクセルオフとブレーキオンの行動をうまく分離できることを確認した (第5章)。一方で、この検証は、DS 実験の限定されたシナリオかつ限られた実験参加者による検証だったため、ナチュラルスティックな運転行動データを用いて、より多くの実験参加者を用いて個人適応型リスク式の妥当性検証を行った結果 (第6章)、同様にアクセルオフとブレーキオンをうまく分離できることを確認した。

### 7.2 先行車追従・接近場面における知覚特性とリスク式構築 (第3章) について

第3章では、「先行車追従・接近場面の運転者の知覚する情報を特定し、その知覚特性を調べて、定式化 (リスク式構築) を行うこと (RQ1)」を課題設定した。その結果、運転者の入力情報となる指標として、2つのオプティカルフローの指標、1/THW と 1/TTC を導き、両者が運転者のリスク感の感覚量と比例することを示した。この2つの指標を使ってリスク式を構築した。この成果で大事なことは、人間の入力となる情報、直接知覚できる情報を特定したことである。直接知覚できる情報は、その後工程である行動にうまく結びつくことや、ユニバーサルな指標として類似する他の場面や条件の時に利用できることが期待できる。実際に、第4章ではこれら2つの指標と行動との関係を示した。また、このリスク式を活用した研究として、車線変更場面への適用(Furuyama, Kondoh & Nakano, 2012; Kondoh, Furuyama, Nakano, Kaminuma & Nemoto, 2012; Zhou & Itoh, 2016; Feng, Ma, Zhu & Ma, 2018) や、割り込み時のリスクを表現するための2次元への展開(De Winter, Mulder, Van Paassen, Abbink & Wieringa, 2008)がみられる。追従以外の場面に適用可能なのは、運転者の視覚的な情報として、不変的なユニバーサルな指標を用いているためと考える。

### 7.3 先行車追従・接近場面における運転行動特性とリスク式の妥当性（第4章）について

第4章では、「知覚特性に基づいて定式化したリスク式が、運転行動にどのように反映されているかを調べること（RQ2）」について示した。具体的には、本論文4.2のDSにおけるブレーキ操作特性で、リスク式における $1/THW$ と $1/TTC$ の役割を示し、リスク式における両パラメータの必要性を示した。さらに、知覚特性と比べると、ブレーキ操作特性に関して、個人間差が大きいことを示した。ブレーキ操作タイミングの個人間差が知覚実験（本論文3.3）に比べて大きいことは、幾何学的に決定される知覚特性には個人間に大きな差がなく、リスクテイクに関する価値や意味が異なるブレーキ操作に個人間差が表出することが考えられる。

本論文4.3では、公道実験において、リスク式の形式がブレーキ操作特性の限界領域を表現することを示した。さらに、本論文4.4では、公道実験における安定した追従場面における $1/THW$ の分布を調べた。結果、追従中の $1/THW$ の分布の位置は、個人間差として2倍以上の差がみられ、リスクへの暴露量に個人間差があることを公道実験から示した。

第4章では、リスク式は運転行動で適用可能である結果が示されたと同時に、リスク式に個人間差を考慮する必要性が示唆された。

なお、このリスク式を適用した運転支援システムが2006年に日産自動車から提案され（Akatsu, 2006; Kuge et al., 2006）、2007年に「ディスタンスコントロールアシスト」として商品化がされている。

### 7.4 個人適応型リスク式の提案とその妥当性（第5章）について

第5章では、「リスク式はいかにして個人適合させるか？（RQ3）」について検討した。リスク式を個人間差に対応させるため、知覚-行為システムの手法を取り入れ、個人適応型リスク式を構築した。その妥当性を検証するため、運転者がアクセルオフとブレーキオンした際のリスク式で算出されるリスク値について、その分離性能をDS実験で確認した結果、個人適合したリスク値（ $RF_{ind}$ ）は、個人適合していないリスク値（ $RF$ ）より、アクセルオフとブレーキオフをうまく分離できることを示した（正検出率は98.6%、誤検出率は0.9%。 $RF$ と比較した向上代はそれぞれ12.9%、89.2%）。これより、個人適応型リスク式の妥当性が検証できた。また、今回、リスク式の妥当性を検証する方法として、アクセルオフとブレーキオンの分別性能で検証したことに関しては、従来研究にみられない評価方法である。

今回の妥当性は、12名の実験参加者、かつ、DSの単調な走行シナリオで検証された結

果であり、より多くの実験参加者かつ実走行環境における検証が課題として残った。

### 7.5 個人適応型リスク式の実走行環境への適用（第6章）について

第6章では、「個人適合したリスク式は、リアルワールドでどれだけ有効か？（RQ4）」について取り組み、第5章で提案した個人適応型リスク式を、50名の実験参加者のデータを含むナチュラルスティックな運転行動データ（NDD）を用いて、実走行路における個人適応型リスク式の妥当性の検証を行った。第5章と同様に、運転者がアクセルオフとブレーキオンした際のリスク式で算出されるリスク値について、その分離性能を確認した結果、個人適合したリスク値（ $RF_{ind}$ ）は、個人適合していないリスク値（ $RF$ ）より、アクセルオフとブレーキオフをうまく分離できることを示した（正検出率は92.0%，誤検出率は8.0%。 $RF$ と比較した向上率はそれぞれ4.0%，30.4%）。これより、個人適応型リスク式の優位性を検証できた。

NDDを活用することにより、多くの実験参加者における検証と、実験ではなく日常の運転で生じている行動を対象にした検証が実現できた。日常の運転は、実験室における運転と異なり、走行環境や運転者の状態が均一にならない。そのため、 $\pi$ 値における個人特性（分母に相当）をどう定義するかが検討が今後取り組むべき課題のひとつと考えられる。

以上により、第3章から第6章を通して、すべてのRQを確認・達成した。以下に、本研究で得られたそのほかの知見、議論、新たな課題を列挙する。

### 7.6 リスク式の構造について

リスク式は、 $1/THW$ と $1/TTC$ の線形和である。両者は、オプティカルフローから獲得できる指標であるが、ここで両者の意味をもう一度考えてみる。 $1/THW$ は潜在的なリスク感を示す。すなわち、現状、顕在化された衝突リスクそのものはないが、将来、何か生じた場合に対処可能かどうかのマージンを示す。一方で、 $1/TTC$ は顕在的なリスク感を示す。 $1/TTC$ はその逆数 $TTC$ にあらわせるように、衝突するまでの時間を示す。このような議論をすると、リスク式の形式として $1/THW$ と $1/TTC$ の積の方が好ましいのではという意見が生じる。一般的にタスクマネジメントの分野では、重要度と緊急度の積で優先度を決定することが浸透している。もし、リスク式が積（ $1/THW \times 1/TTC$ ）として計算する場合、 $1/TTC$ が

ゼロ<sup>10</sup>の場合に、 $1/THW$  がいくつであっても（車間距離が短くても）、リスク値はゼロになり、実感と合わなくなる。そこで、リスク式は、2つの異なる特性を持つリスクの積み上げとして算出している。また、本研究で得られた結果として、 $1/THW$  と  $1/TTC$  は、ブレーキ操作実験（本論文 4.2）により独立した指標であることが分かっている。さらに、リスク式で、アクセルオフとブレーキオンの分別性能を評価した。DS 実験の結果、高い分別性能（正検出率は 98.6%，誤検出率は 0.9%）を有している。以上により、線形和で算出されるリスク式は、妥当であると考えられる。

なお、このように異なる種類の比率（無次元）の和を算出する指標（RF 以外には、行動経済学における行動判断や野球の打撃成績を示す OPS などがある）は、実際の結果をうまく説明できているため、よく用いられている。

### 7.7 アフォーダンス研究（ $\pi$ 値）における新たな展開

本研究では、アフォーダンス研究（ $\pi$  値）として2つの新奇性がある。

ひとつめは、従来のアフォーダンス研究における個人特性（ $\pi$  値の分母に相当）の多くは、足の長さや肩幅など、体格の特性が対象になっていた。本研究における個人特性は、行動特性である。なお、行動特性を用いた研究は僅かに見られる<sup>11</sup>が、十分な知見が得られておらず、定量的に  $\pi$  値の優位性を示したのは本研究が最初と思われる。

ふたつめは、意味の異なる複数の  $\pi$  値の和で行動の可否判断を判定したことである。従来の  $\pi$  値研究は、単項式として取り扱っていた。本研究により、多項式の形式をもつ複数の  $\pi$  値の和でも、行動の可否判断が可能であることが本研究により示された。

$\pi$  値の個人特性は、ある特定の条件（個人間差、個人内差、場所依存、環境、行為の目的など）における個人特性を表しており、その特性を最もよく表すパラメータを設定する必要がある。第4章と第5章は、操作ばらつきを含むブレーキ操作判断特性を対象としたため、個人特性を表現する代表値として、ブレーキオンの 50%ile 値を採用した。個人特性を表すパラメータとして、適用する行動が境界域のようなものを目標にしている場合に 95%ile 値の方が適切である可能性もあり、また、ランダムな母集団を持つ分布特性をもつ場合は平均値のほうが相応しいと思われる。

<sup>10</sup>  $1/TTC (=Vr/D)$  がゼロになる状況は、理論的には相対速度  $Vr$  がゼロのときである。リアルワールドにおいて、ゼロになる瞬間はほぼないが、人間の知覚特性の観点でいえば、知覚の閾値以下であれば、ゼロとみなすこともできる。

<sup>11</sup> 個人特性に行動特性を用いた研究として、各個人の最大車速から追い越し可否判断(Morice, 2010)や最大加減速度の条件違いによる交差点における交差車両に対して、先に行くか、交差車両をやりすごすかの判断(Marti, 2015)があるが、両研究とも現象確認に留まっている。

$\pi$  値化することにより、個人間差のみならず、個人内の条件間を超えた様々な特性の評価をすることが可能になると考えられる。例えば、走行環境が均一であり、また、運転者の普段の運転特性が既知の場合、それとは乖離した場合の行動評価が可能である。具体的には運転中のディストラクション、居眠り運転、飲酒運転などを検出できる可能性がある。また、運転者の普段の運転特性が既知かつ運転者の運転状態が既知の場合は、走行環境のタスクデマンドの変化を検出できる可能性がある。すなわち、個人の運転特性（ $\pi$  値の分母）を、評価する条件に設定することで、様々な評価の可能性が期待できる。

$\pi$  値は個人ごとやタスクごとにレベルを一律に変えられることができるため、発展させた形態としては、 $\pi$  値研究にフロー理論を適用することが考えられる。フロー理論 (Csikszentmihalyi, 1996) とは、チクセントミハイによって提唱された考え方で、ヒトの作業動機を適切に保ち、生産性を向上させる手法である。 $\pi$  値を用いた指標は、各個人に対して難易度が少し高い状態（たとえば 10 % 難しい）を、簡便かつ定量的に設定することも可能であり、フロー理論との相性がよく、可能性が期待できる研究手法になると考えられる。

運転支援に適用した形態としては、運転支援システムのパーソナライゼーション化が考えられる。今回の評価項目であった、運転者個人の感覚に合致したパーソナライゼーションされたブレーキ操作支援システム、普段の運転を学習しディストラクションによる逸脱量を検出する不安全運転検出システム、フローの概念を適用し個々の運転スキルに合わせて運転をより楽しい運転を支援するシステムなどが考えられる。

現在、自動運転や運転支援システムのなかで、自動でブレーキ制御が行われるシステムが普及している。これらのシステムで懸念されるのが、過信の問題である。今回提案した個人適応型リスク式を自動ブレーキ制御に応用することが過信に対するひとつの解決方法と考えられる。すなわち、先行車追従・接近時の各運転者のブレーキ行動を学習することで、過信を生じないよう普段のブレーキタイミングより少し遅めにブレーキ制御させることが可能になる。 $\pi$  値化の考え方、および、個人同定したリスク式  $RF_{ind}$  は、自動運転や運転支援システムのヒューマンファクターの解決に向けて、大きな可能性を持っていると思われる。

## 7.8 NDS の活用とその意義

NDS（ナチュラルスティックな運転行動研究）は、2000 年代から本格的に開始され（例えば、100-car study (Neale et al., 2005)）、大規模な研究グループや政府主導で行われている。実験規模や実験倫理の観点で、単独の研究者が行うことは困難である。NDS は、実験ではなく、実世界における車の使われ方そのものが研究対象となるため、得られた成果は今後の技術開発にとって、尊いものである。本研究では、提案したリスク式の評価に NDD を用い

たが、運転行動そのものの検討（例えば、先行車接近に対してどんなタイミングでブレーキを踏んでいるか？追従時にどれぐらいの車間距離で追従しているか？）や、運転特性の分布（例えば、一般的な運転者はどれぐらいの車間距離で追従しているか？）など、製品を開発する上で必要な知見が得られる。

人間研究をするうえで、実験室で基本的な人間特性を明らかにすることは重要である。これに加えて、長期間にわたり実際のユーザーの使われ方を把握した上で、商品開発することは、より実態に即した商品の開発が可能になる。さらには、商品そのものをNDDで使われ方の評価することは、次の製品開発への貴重なノウハウになる。

本研究で得られたリアルワールドにおけるブレーキ操作の個人間差のばらつきは、ブレーキ制御を行うシステム開発に有益な情報になり得る。

近年、世界中でNDS<sup>12</sup>が推進されており、ビッグデータ活用技術と併せて、今後、不可欠な研究ツールになっていくものと思われる。

### 7.9 個人内差、特に運転状態について

運転者の行動を測る上で、本研究で取り組んだ走行環境情報、個人特性が大事であるが、個人内差の要素である運転者の運転状態や感情については、今後の検討の余地がある。リスク式は、算出されるリスク値が低い場合（例えば車間距離が長い場合）に一般的に危険は少ない。一方で、リスクホメオスタシスと呼ばれるように、運転しながら携帯電話の使用する場合は自ずと車間距離を長く取るであろうし、運転に集中し活性している場合は車間距離が短くなる可能性がある。これらの場面ではどちらが安全であろうか？リスク式で表現されるリスク値は、運転状態や感情が含まれていない。交通事故の要因でよく取り上げられるのが、運転状態（居眠り、疲労、飲酒、Impairment）や感情（Rage Driving、焦り）であり、現状のリスク値で真の安全性を評価するには、運転状態や感情を含む検討が必要と考えられる。

### 7.10 本研究の人間科学に対する貢献

本研究は、先行車追従・接近場面のリスク式を構築するという課題を通じて、様々な研究分野の知見や手法を取り入れている。1/THWや1/TTCの感覚量の定量化（本論文3.2, 3.4）

---

<sup>12</sup> 例えば、欧州で推進したUDRIVEプロジェクト、オーストラリアのAustralian Naturalistic Driving Study、カナダのCanada Naturalistic Driving Studyなどがある。

や  $1/TTC$  の閾値実験（本論文 3.3）は、一般的には、心理物理学の実験に属する。また、本研究の実験デザイン手法の大部分は、人間工学の分野である。リスク式を個人適応する必要性の議論（本論文第4章～第6章）は、リスク式を適用する運転支援システムとドライバの関係を扱うヒューマンファクターにおけるテーマであり、システム工学の分野である。リスク式の個人適応方法（本論文 5.3）は、生態心理学におけるアフォーダンスから着想した。

本研究は、工学の観点、あるいは、心理学の観点のみでは捉えきれない課題であった。そして、本研究は、ヒト中心の観点で課題を捉え最適な解法を選択したため、結果として様々な研究分野の知見や手法を駆使した。人間科学は、生来、科学的方法を適用し分野の垣根を越えて人間にまつわる課題を問題解決する学問であるが、本研究は、まさに人間科学における研究であり、人間科学研究としてうまく完結した一例といえる。

以下に、本研究における人間科学への貢献について記載する。

### a) 行動理解に対する研究手法のロールモデルを体現したこと

本研究では、自動車の運転場面におけるリスク式の構築を行った。このリスク式構築までの大まかなプロセスは、1) ヒトの入力となる指標の特定を行い、2) その指標と行動との関係を検証し、3) 条件に適合するように指標のパラメータを同定することでヒトの行動がリスク式として表現できるようになった。この研究手順は、運転行動理解のみならず、様々なヒトの行動理解研究に適用可能と思われる。

このプロセスの中で最も重要なのは、1)ヒトの入力となる指標（Ecological Physics）の特定である。本論文 3.2, 3.4 では、マグニチュード推定法を用いてヒトの感覚量を定量化する際に、刺激強度の考え方について再考することになった。すなわち、先行車の追従・接近場面は、車間距離や接近速度、先行車の減速度で表現されることが一般的であるが、ヒトの刺激入力の観点では、オプティカルフローの指標（ $1/THW$  や  $1/TTC$ ）が有力となる。結果、この特定された指標が、2) 行動との関係、3) 条件が変わった場合のパラメータ同定に研究が発展しても、その指標をそのまま利用できた。すなわち、不変的な指標であった。

以上により、一般的かつ定石のような研究手順であるが、シンプルで完結した結果が得られた。今後、この研究手法が様々な行動理解研究へ展開することを期待する。

### b) 人間特性の条件違い（個人間差）の解釈に、一石を投じたこと

本研究では、個人間差を吸収する個人適応したリスク式の提案を行い、その妥当性を検証した。人間研究を行ううえで、個人間差の取り扱い、大きな課題のひとつといえる。本研究では、個人間差をどのように扱い、個人ごとの特性に対してどのように対応すべきかを一例を示したといえる。



さらに、人間特性の条件違いとしては、個人間差の他に個人内差がある。特に自動車の運転行動の分野では、体調の変化（疲労、眠気）、気分・感情の変化（イライラ、アグレッシブ）が安全な運行に影響を及ぼす。今後の研究として、人間特性の差異や変化をどう捉えていくか検討する際に、本研究における個人適応手法（アフォーダンス研究）は、発展性がある研究手法といえる。

c) リアリティのより高い、より実践的な人間科学研究への展開

人間科学研究は、実践性が問われる分野の研究であり、ヒトの生活場面・活動場面に根ざした研究にすべきであると考えられる。本研究では、最終的な評価として、NDDを活用した（第6章）。NDDは人間の日常生活の一部そのものであり、本研究を実験という限られた環境からリアリティの高い人間科学研究、より実践的な人間科学研究にシフトさせることができた。

近年、データを簡便に計測できる技術が整備されつつあるため、人間科学研究でNDDやフィールドスタディへのシフトが加速すると思われる。一方で、大規模かつノイズを多く含むデータを、いかに定量的に分析するかが鍵となる。そのためには、今後、前述した、指標の特定や対象シーンの抽出（本論文6.5）の方法の構築が重要になると考えられる。

## 8 結論

本研究では、運転者の運転操作感覚に合致する自動運転や運転支援システムの制御則に適用を目的とした、先行車追従・接近時の運転者の主観的なリスク感を定式化するリスク式を、知覚特性に基づき構築した。リスク式は、オプティカルフローに起因する  $1/THW$ （車間時間の逆数）と  $1/TTC$ （衝突余裕時間の逆数）の2つの指標で構成される。リスク式と運転行動との関係を調査した結果、この2つの指標が適切であることを確認した。また、運転行動には個人間差がみられるため、個人適応型リスク式を再構築した。個人適応型リスク式の妥当性を検証するため、ドライビングシミュレータ実験とナチュラルスティックな運転行動データを用いて、アクセルオフとブレーキオンの分離性能を確認した結果、個人適応型リスク式は、両者をうまく分離できることがわかった。今後、個人適応型リスク式を運転支援システム・自動運転に適用され、運転者の感覚に合致した制御が実現され、交通事故低減に貢献できることが望まれる。さらに、知覚-行為システムの手法を用いた個人間差・個人内差の検討が加速し、人間中心のヒューマンマシンインタラクションシステムの構築の一助になれば幸いである。

## 謝辞/ACKNOWLEDGEMENTS

本論文は、大学4年（1999年4月）から、学位取得申請（2019年7月）に至るまでの、自動車の運転時の運転者の知覚特性や運転行動の知見についてまとめたものである。学位を取得までに長すぎる年月を費やしてしまった一方で、その間、様々な人に出会い、議論を重ねることで、10年前または20年前には想像できないような方向に議論が発展し、DS実験からNDD解析を活用し、多くの経験・知見を得ることができました。（This dissertation is, like an anthology of my studies about perception-action in driving for two decades, from my senior (1999) to present (2019). I have invested the huge time to get Ph.D, but I could get the amazing outcome, which I had never thought in the past one decade and/or two decades, with making the best use of DS experiments and NDD, via many encounters with great friends and fruitful discussions with them.)

本論文をまとめるにあたり、終始暖かい激励と御指導、御鞭撻をいただいた早稲田大学教授 古山宣洋 博士に、心より感謝申し上げます。2009年に初めてお目にかかり、以降、幾度もディスカッションさせていただくことで、学際的な気づきが創出され、工学の観点のみでは得られない、味わい深い研究になったことに深く感謝を申し上げます。

研究の議論、博士論文の作成にあたり早稲田大学教授 三嶋博之 博士には、長きにわたり、充実した技術論議させていただき、細やかなアドバイスを賜りました。また、学位申請時には、多くのサポートして頂いたことに深謝します。

学位論文審査において貴重な御指導、ご助言を頂きました元早稲田大学 名誉教授 石田敏郎 博士、早稲田大学 教授 加藤麻樹 博士には、御礼申し上げます。

大学生のころから芝浦工業大学 小口・澤田研究室で苦楽を共にし、研究論文を共に仕上げた芝浦工業大学 准教授 廣瀬敏也 博士には、深く感謝申し上げます。また、芝浦工業大学 名誉学長 小口泰平 博士、名誉教授 澤田東一 博士には、修士課程修了後も、博士号取得に向けて、長きにわたる御指導、本当に感謝しております。また、芝浦工業大学で澤田・廣瀬研究室に所属し、本研究の実験のサポートをいただいた岩瀬卓也氏、山本雄貴氏、金子直司氏、新田哲也氏、近藤維摩氏には、大変お世話になりました。

多忙な量産開発業務を継続する中で、大学院後期課程への機会を与え、学業への配慮をいただきました。当時の上司の方々、安野芳樹氏、川添寛氏、江川健一氏、業務を通じて御指導していただきました北崎智之 博士、山村智弘氏、久家伸友氏、赤津洋介氏、根本英明氏、寸田剛司氏には、深く感謝申し上げます。

解析サポート、研究のアドバイスをいただいたエントロピーコントロール ボアアーウィン博士に感謝の意を表します。（Thanks to Dr. Erwin Boer in Entropy Control Inc. for his

## 謝辞/ACKNOWLEDGEMENTS

---

help with the research process and his friendship for long time. It is a pleasure to work with you.)

米国 バージニア工科大学 交通研究所 出向以降，御指導と激励，解析サポートをしていただいたバージニア工科大学 交通研究所 自動運転部部長 マクローリン シェーン博士，同研究所 データ解析サポート部部長 ペレス ミュゲル博士に心から感謝の意を表します。(I sincerely would like to express my appreciation to Dr. Shane McLaughlin and Dr. Miguel Perez in Virginia Tech Transportation Institute. I would like to thank Dr. McLaughlin for his guidance, his time, and patient throughout/after my visiting scholar period. Special thanks to Dr. Perez for wonderful support and understanding, for long time. You both are wonderful mentors on research and life, and great friends, without your support I would not have been able to obtain fruitful achievement.)

実験にご協力いただいた実験参加者のみなさまに深く感謝いたします。

最後に，この博士論文が完成するまで温かく見守り，辛抱強く支援してくださった妻 かり，両親 正昭 恵美子に対しては深い感謝の意を表して謝辞と致します。

2019年 7月(July, 2019)

近藤 崇之  
Takayuki Kondoh

## 著者論文目録

### 本研究に関する研究論文

- Kondoh, T., Yamamura, T., Kitazaki, S., Kuge, N., & Boer, E. R. (2008). Identification of visual cues and quantification of drivers' perception of proximity risk to the lead vehicle in car-following situations. *Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics*, 1(2), 170-180.
- Kondoh, T., Furuyama, N., Hirose, T., & Sawada, T. (2014). Direct evidence of the inverse of TTC hypothesis for driver's perception in car-closing situations. *International Journal of Automotive Engineering*, 5(4), 121-128. doi:10.20485/jsaeijae.5.4\_121
- 近藤崇之, 廣瀬敏也, 古山宣洋. (2014). 先行車への接近場面における個人適応型リスク式の提案. *人間工学*, 50(6), 350-358.

### 本研究に関する技術解説

- Perez, M., McLaughlin, S., Kondo, T., Antin, J., McClafferty, J., Lee, S., Hankey, J., Dingus, T. (2016). Transportation safety meets big data: The SHRP 2 naturalistic driving database. *Journal of the Society of Instrument and Control Engineers*, 55(5), 415-421. doi:10.11499/sicejl.55.415

### 本研究に関する学術講演

- 澤田東一, 近藤崇之, & 小口泰平. (2000). 運転者の視覚インターフェースに関する研究. 日本人間工学会第30回関東大会講演集, December, 2002.
- 近藤崇之, 山村智弘, & 北崎智之. (2005). 先行車接近時におけるリスク感の定量化に関する研究. 自動車技術会学術講演会前刷集, 2005, 23-26.
- Kondoh, T., Yamamura, T., Kitazaki, S., Kuge, N., & Boer, E. R. (2006). Identification of visual cues and quantification of drivers' perception of proximity risk to the lead vehicle in car-following situations. *Paper presented at the Proceedings of Driving Simulation Conference Asia/Pacific*, CD-ROM.
- Kondoh, T., & Furuyama, N. (2015).  $\pi$  number study on driving behavior: Example of braking behavior in car-closing situations. *Paper presented at the 18th International Conference on Perception and Action*, MN, U.S.A.
- Kondoh, T., McLaughlin, S., & Perez, M. (2017). Individual differences in transition from gas to brake in following situations. *Paper presented at the 6th International Symposium on Naturalistic Driving Research*, the Hague, the Netherland.

## 付録

### 一対比較実験における視角変化による刺激強度の算出

本節では、一対比較実験で用いられた相対的な刺激強度と刺激強度の定義について記載する。

以下に2つの接近条件，すなわち，先行車に一定の相対速度で接近する条件（ケース A）と，先行車が一定の減速度で減速し接近する条件（ケース B）について，説明する。

図 2-7 と図 2-8 に，ケース A とケース B における  $1/TTC$  のふるまいを示した。 $1/TTC$ ，すなわち刺激強度は，車間距離が短いほど，刺激強度が大きくなる。本論文 3.4 の実験の全ての条件について，先行車の接近の映像は，先行車が特定の位置に到達した時点（図 A-1 における  $D_{disappearance}$ ）で消失するように設定してある。すなわち，刺激強度は，先行車のイメージが消える直前に最も大きくなる。先行車の最後の映像が残像として残り，実験参加者は先行車に接近した最後の残像をリスク感の推定に用いていたと考えられる。

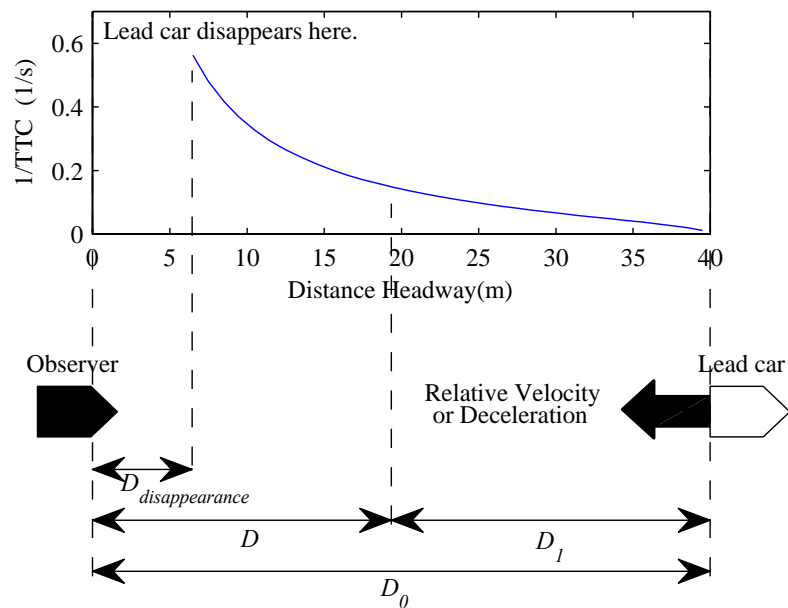


図 A-1 先行車接近場面における車間距離と  $1/TTC$  の概念図

A: 先行車が一定の相対速度で接近した場合

標準刺激の刺激強度（添え字 s）と比較刺激の刺激強度（添え字 t）を以下に式 (A-1)，式 (A-2) に示す。

$$\frac{1}{TTC_s} = \frac{V_r_s}{D_s} \quad \dots \quad A-1$$

$$\frac{1}{TTC_t} = \frac{V_r_t}{D_t} \quad \dots \quad A-2$$

刺激間の比較は，比例尺度であるため，2つの刺激の比率は，式 (A-3) で表現できる。

$$\text{Ratio of Stimuli} = \left(\frac{1}{TTC_t}\right) \div \left(\frac{1}{TTC_s}\right) = \left(\frac{V_{r_t}}{D_t}\right) \div \left(\frac{V_{r_s}}{D_s}\right) \quad \dots \quad \text{A-3}$$

刺激強度の比較は、先行車が消える直前の像の車間距離（同じ車間距離）を基準に行われたと仮定すると、標準刺激と比較刺激の比率は、式（A-4）のように表現される。

$$\text{Ratio of Stimuli} = \left(\frac{V_{r_t}}{V_{r_s}}\right)^{1.0} \quad \dots \quad \text{A-4}$$

ここで、標準刺激の相対速度を 16.7 m/s、比較刺激の相対速度を 11.1 m/s とした場合に、両者の刺激の比率は、0.67 である。

**B:** 先行車が一定の相対減速度で接近した場合

先行車がある初期車間距離から一定の相対減速度で減速・接近した場合に、ある車間距離  $D_t$ （または  $D_0 - D$ ）における先行車の相対速度  $V_{ra}$  は式（A-5）のように表現できる。

$$V_{ra} = \sqrt{2a_s D_t} = \sqrt{2a_s (D_0 - D_s)} \quad \dots \quad \text{A-5}$$

このときの、標準刺激の  $1/TTC$  と比較刺激の  $1/TTC$  は、それぞれ式（A-6）と（A-7）のように表現できる。

$$\frac{1}{TTC_s} = \frac{\sqrt{2a_s (D_0 - D_s)}}{D_s} \quad \dots \quad \text{A-6}$$

$$\frac{1}{TTC_t} = \frac{\sqrt{2a_t (D_0 - D_t)}}{D_t} \quad \dots \quad \text{A-7}$$

これらの刺激は、比例尺度である。2つの刺激の比率は、式（A-8）のように表現できる。

$$\text{Ratio of Stimuli} = \left(\frac{1}{TTC_t}\right) \div \left(\frac{1}{TTC_s}\right) = \frac{\sqrt{2a_t (D_0 - D_t)}}{D_t} \frac{D_s}{\sqrt{2a_s (D_0 - D_s)}} = \left(\frac{a_t}{a_s}\right)^{0.5} \quad \dots \quad \text{A-8}$$

刺激強度の比較は、先行車が消える直前の像の車間距離（同じ車間距離）を基準に行われたと仮定すると、標準刺激と比較刺激の比率は、式（A-9）のように表現される。

$$\text{Ratio of Stimuli} = \sqrt{\frac{a_t}{a_s}} = \left(\frac{a_t}{a_s}\right)^{0.5} \quad \dots \quad \text{A-9}$$

ここで、標準刺激の先行車の減速度を  $5 \text{ m/s}^2$ 、比較刺激の先行車の減速度を  $7 \text{ m/s}^2$  とした場合に、両者の刺激の比率は、1.18 である。

## 参考文献

- Abbink, D. A., Van Paassen, M. M., Boer, E. R., & De Winter, J. C. F. (2018). What determines drivers' speed? A replication Of three behavioural adaptation experiments in a single driving simulator study Au - Melman, Timo. *Ergonomics*, *61*, 966-987. 10.1080/00140139.2018.1426790
- 赤松幹之 (2016). 自動車技術ハンドブック 人間工学編. 自動車技術会.
- Akatsu, Y. (2006). Innovative safety concept and solution. Convergence Transportation Electronics Association.
- Ayres, T. J., Li, L., Schleuning, D., & Young, D. (2001). Preferred time-headway of highway drivers. Paper presented at the Intelligent Transportation Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE.
- Bardy, B. G., Baumberger, B., Flückiger, M., & Laurent, M. (1992). On the role of global and local visual information in goal-directed walking. *Acta Psychologica*, *81*, 199-210. [http://dx.doi.org/10.1016/0001-6918\(92\)90018-9](http://dx.doi.org/10.1016/0001-6918(92)90018-9)
- Bellis, E., & Page, J. (2008). National motor vehicle crash causation survey (Nmvcsc) sas analytical users manual.
- Benguigui, N., Ripoll, H., & Broderick, M. P. (2003). Time-to-contact estimation of accelerated stimuli is based on first-order information. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *29*, 1083-1101. 10.1037/0096-1523.29.6.1083
- Bootsma, R. J., & Craig, C. M. (2002). Global and local contributions to the optical specification of time to contact: Observer sensitivity to composite tau. *Perception*, *31*, 901-924.
- Bootsma, R. J., & Van Wieringen, P. C. (1990). Timing an attacking forehand drive in table tennis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *16*, 21.
- Brackstone, M., & McDonald, M. (2007). Driver headway: How close is too close on a motorway? *Ergonomics*, *50*, 1183-1195. 10.1080/00140130701318665 (In eng.)
- Brackstone, M., Waterson, B., & McDonald, M. (2009). Determinants of following headway in congested traffic. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *12*, 131-142.
- Brown, I. D., & Groeger, J. A. (1988). Risk perception and decision taking during the transition between novice and experienced driver dtatus. *Ergonomics*, *31*, 585-597.
- Brown, T. L., Lee, J. D., & Mcgehee, D. V. (2000). Attention-based model of driver performance in rear-end collisions. *Transportation Research Record*, *1724*, 14-20. 10.3141/1724-03
- Cavallo, V., Brun-Dei, M., Laya, O., & Neboit, M. (1988a). Perception and anticipation in negotiating curves: The role of driving experience. *Vision in Vehicles II Second International Conference*
-



- on Vision in Vehicles.*
- Cavallo, V., & Laurent, M. (1988b). Visual information and skill level in time-to-collision estimation. *Perception, 17*, 623-632. (In eng.)
- Craig, C., & Watson, G. (2011). An affordance based approach to decision making in sport: Discussing a novel methodological framework. *Revista de Psicología del Deporte, 20*, 689-708.
- Csikszentmihalyi, M. (1996). *Creativity: Flow and the psychology of discovery and invention*. Harper Collins Publishers.
- 大門樹 (2011). ドライバー特性に基づいた自動車の情報化・運転支援 (特集 オートモーティブ) . パナソニック技報, 57, 39-43.
- Davies, M. N. O., & Green, P. R. (1990). Optic flow-field variables trigger landing in hawk but not in pigeons. *Naturwissenschaften, 77*, 142-144.
- De Winter, J. C. F., Mulder, M., Van Paassen, M. M., Abbink, D. A., & Wieringa, P. A. (2008). A two-dimensional weighting function for a driver assistance system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 38*, 189-195. 10.1109/TSMCB.2007.908860
- Delucia, P. (1999). Size-arrival effects: The potential roles of conflicts between monocular and binocular time-to-contact information, and of computer aliasing. *Percept Psychophys, 61*, 1168-1177. 10.3758/BF03207621
- Delucia, P., Kaiser, M., Bush, J., Meyer, L., & Sweet, B. (2003). Information integration in judgements of time to contact. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A, 56*, 1165-1189. 10.1080/02724980343000053
- Denton, G. (1966). A subjective scale of speed when driving a motor vehicle. *Ergonomics, 9*(3), 203-210.
- Endsley, M. R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 37*, 32-64.
- Faucher, P. S. (1996). A comparison of manual versus automatic control of headway as a function of driver characteristics. In *Intelligent Transportation: Realizing the Future*. Abstracts of the Third World Congress on Intelligent Transport Systems, ITS America.
- Feng, Z., Ma, X., Zhu, X., & Ma, Z. (2018). Analysis of driver brake behavior under critical cut-in scenarios. *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)* (pp. 2054-2059). IEEE.
- Fildes, B. N., Leening, A. C., & Corrigan, J. M. (1989). Speed perception 2: Drivers' judgements of safety and speed on rural straight and curved roads and for different following distances. FORS.
- Flascher, Oded Moses, Dimensions of perceptual scaling of passability (1998). Doctoral Dissertations.
-

- AAI9831875.
- Fuller, R. (2005). Towards a general theory of driver behaviour. *Accident Analysis & Prevention*, 37, 461-472.
- Furuyama, N., Kondoh, T., & Nakano, T. (2012). To merge, or not to merge? ~a study on audiovisual information as higher order invariants toward risk feelings in highway driving behavior~. *Paper presented at 12th European workshop on Ecological psychology*. Madrid, Spain:
- Gibson, J. J. (1960). The concept of the stimulus in psychology. *American Psychologist*, 15, 694.
- Gibson, J. J. (1972/1982). Ecological physics, magic, and reality. In Reed, E., & Jones, R. (Eds.), *Reasons for realism: Selected essays of JJ Gibson* (pp. 212-223). Lawrence Erlbaum Associates.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Routledge.
- Gibson, J. J., & Crooks, L. E. (1938). A theoretical field-analysis of automobile-driving. *The American Journal of Psychology*, 51, 453-471. 10.2307/1416145
- Goodrich, M. A., Boer, E. R., & Inoue, H. (1998). Brake initiation and braking dynamics: A human-centered study of desired acc characteristics. *Basic Research, Nissan Research and Development, Inc.* Citeseer.
- Gray, R., & Regan, D. (1998). Accuracy of estimating time to collision using binocular and monocular information. *Vision Research*, 38, 499-512.
- Green, P. (2013). Standard definitions for driving measures and statistics: Overview and status of recommended practice J2944. *Proceedings of the 5th international conference on automotive user interfaces and interactive vehicular applications* (pp. 184-191). ACM.
- Gulliksen, H. (1956). A least squares solution for paired comparisons with incomplete data. *Psychometrika*, 21, 125-134.
- 芳賀繁 (2009). 安全技術では事故を減らせない: リスク補償行動とホメオスタシス理論 (リスクと安全・安心をめぐる心と技術). 電子情報通信学会技術研究報告 Sss, 安全性, 109, 9-11.
- Hancock, P., & Diaz, D. (2002). Ergonomics as a foundation for a science of purpose. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3, 115-123.
- Higuchi, T., Cinelli, M. E., Greig, M. A., & Patla, A. E. (2006). Locomotion through apertures when wider space for locomotion is necessary: Adaptation to artificially altered bodily States. *Exp Brain Res*, 175, 50-59. 10.1007/s00221-006-0525-4
- Hirose, T., Sawada, T., & Oguchi, Y. (2004). Basic study on tailormade braking support system. *IATSS research*, 28, 68-77.
-

- Hoffmann, E. R., & Mortimer, R. G. (1994). Drivers' estimates of time to collision. *Accident Analysis & Prevention*, 26, 511-520.
- Horst, A. R. A. V. D. (1990). A time-based analysis of road user behaviour in normal and critical encounters, (PhD thesis). Delft, The Netherlands.
- 稲垣敏之 (2010). 人と機械の協調における安全と安心 : 人間中心の自動化の視点からの考察. 日本交通科学協議会誌, 9, 11-20.
- 伊佐治和美, 津留直彦, 和田隆広, 今井啓介, 土居俊一, 金子弘 (2007). 前後方向の接近に伴う危険状態評価に関する研究 (第 1 報) ードライバ操作量に基づく接近離間状態評価指標の提案. 自動車技術会論文集, 38, 25-30.
- 石橋基範, 大栗政幸, 赤松幹之 (2004). 運転スタイル・運転負担感受性の個人特性指標と運転行動. 自動車技術, 58, 34-39.
- Kadar, E. E., & Shaw, R. E. (2000). Toward an ecological field theory of perceptual control of locomotion. *Ecological Psychology*, 12, 141-180.
- Kahneman, D. (1999). Objective happiness. In D. Kahneman, E. Diener, & N. Schwarz (Eds.), *Well-being: The foundations of hedonic psychology* (pp. 3-25). New York, NY, US: Russell Sage Foundation.
- Kaiser, M. K., & Mowafy, L. (1993). Optical specification of time-to-passage: observers' sensitivity to global tau. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19, 1028-1040.
- Kiefer, R. J., Flannagan, C. A., & Jerome, C. J. (2006). Time-to-collision judgments under realistic driving conditions. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 48, 334-345.
- Kitajima, S., Marumo, Y., Hiraoka, T., & Itoh, M. (2008). Theoretical and empirical comparison about evaluation indices concerning driver's rear-end collision risk. *Proceeding of 9th International Symposium on Advanced Vehicle Control*.
- 国土交通省 (2017). 運転支援技術・自動運転技術の進化と普及.
- 近藤倫明. (2000). 視距離 視覚情報処理ハンドブック (pp. 449-455).
- Kondoh, T., Furuyama, N., Nakano, T., Kaminuma, A., & Nemoto, H. (2012). To merge, or not to merge? ~ecologizing an index of merging decision in the highway driving behavior~. *Paper presented at 12th European workshop on Ecological psychology*. Madrid, Spain.
- Kondoh, T., Mclaughlin, S., Yamamura, T., Kuge, N., Perez, M., & Sunda, T. (2015). Detailed investigation of real-time steering entropy sensitivity in calling events. *Paper presented at FAST-zero'15: 3rd International Symposium on Future Active Safety Technology Toward zero*
-

- traffic accidents, 2015.*
- 近藤崇之, 山村智弘, 久家伸友, ペレスミュゲル, 寸田剛司 (2015). 運転者負荷定量化のためのリアルタイム・ステアリングエントロピー法の開発. *自動車技術会論文集*, 46, 167-172.
- 久家伸友, 落合清史, 上野裕史, 前田公三. (1993). 運転行動解析に基づく追突事故要因の考察. *日産技報*, 64-71.
- Kuge, N., Yamamura, T., Boer, E. R., Ward, N. J., & Manser, M. P. (2006). Study on driver's car following abilities based on an active haptic support function. *SAE International*.
- Lee, D. N. (1976). A Theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. *Perception*, 5, 437-459.
- Lee, D. N. (1998). Guiding movement by coupling taus. *Ecological Psychology*, 10, 221-250.
- Lee, D. N., Davies, M. N. O., & Green, P. R. (1993). Visual control of velocity of approach by pigeons when landing. *Journal of Experimental Biology*, 180, 85-104.
- Lee, D. N., & Reddish, P. E. (1981). Plummeting gannets: A paradigm of ecological optics. *Nature*.
- Lee, D. N., & Young, D. S. (1985). Visual timing of interceptive action. In Ingle, D. J., Jeannerod, M., & Lee, D. N. (Eds.), *Brain Mechanisms and Spatial Vision* (pp. 1-30). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Lee, D. N., Young, D. S., Reddish, P. E., Lough, S., & Clayton, T. M. H. (1983). Visual timing in hitting an accelerating ball. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 35, 333-346. 10.1080/14640748308402138
- Lee, S. E., Simons-Morton, B. G., Klauer, S. E., Ouimet, M. C., & Dingus, T. A. (2011). Naturalistic assessment of novice teenage crash experience. *Accident Analysis & Prevention*, 43, 1472-1479. 10.1016/j.aap.2011.02.026
- Lobjois, R., Benguigui, N., Bertsch, J., & Broderick, M. P. (2008). Collision avoidance behavior as a function of aging and tennis playing. *Experimental Brain Research*, 184, 457-468. 10.1007/s00221-007-1117-7
- Lobjois, R., & Cavallo, V. (2009). The effects of aging on street-crossing behavior: From estimation to actual crossing. *Accident Analysis & Prevention*, 41, 259-267. 10.1016/j.aap.2008.12.001
- Marti, G., Morice, A. H. P., & Montagne, G. (2015). Drivers' decision-making when attempting to cross an intersection results from choice between affordances. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 1026.
- 松田隆夫 (1995). *視知覚*. 培風館.
- Mclean, J. R., & Hoffmann, E. R. (1975). Steering reversals as a measure of driver performance and
-

- steering task difficulty. *Human Factors*, 17, 248-256.
- McLeod, R. W., & Ross, H. E. (1983). Optic-flow and cognitive factors in time-to-collision estimates. *Perception*, 12, 417-423.
- Michaels, C. F., Zeinstra, E. B., & Oudejans, R. R. D. (2001). Information and action in punching a falling ball. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A*, 54, 69-93.
- 三嶋博之 (1994). “またぎ” と “くぐり” のアフォーダンス知覚. *心理学研究*, 64, 469-475. 10.4992/jjpsy.64.469
- 三嶋博之 (2012). 人と車の協調のための生態心理学 (特集 安心を考える). *自動車技術*, 66, 31-35.
- 三嶋博之 (2013). 人とクルマの知覚論. In 佐々木正人 (Ed.) 身体 環境とのエンカウンター (p. 133-146). Vol. 1. 東京大学出版会.
- Morice, A. H. P. (2010). Decision making as a perceptual process: The selection and regulation of behavior using affordances, *In proceedings of 11th European Workshop of Ecological Psychology*, 2010
- 森田和元, 大野督史, 関根道昭 (2005). Time-To-Collision はブレーキ操作タイミングを決定するか. *第4回ITS シンポジウム 2005*.
- 森田和元, 関根道昭, 岡田竹雄, 益子仁一, 大野督史 (2005). 高齢運転者の認知・操作特性に関する実験的検討. 交通安全環境研究所研究発表会講演概要 (交通安全環境研究所フォーラム講演概要) .
- 武藤真介 (1982). *計量心理学 現代の心理科学*. 朝倉書店.
- 内閣府 (2016). 平成 28 年度版 交通安全白書.
- Nakayama, O., Futami, T., Nakamura, T., & Boer, E. R. (1999). Development of a steering entropy method for evaluating driver workload. *SAE transactions*, 108, 1686-1695.
- 中山沖彦, 二見徹, 中村友一, ボアアアアウィン (1999). 運転者負荷定量手法「ステアリングエントロピー法」の開発. *自動車技術会'99 年春季学術講演会前刷集*.
- Neale, V. L., Dingus, T. A., Klauer, S. G., Sudweeks, J., & Goodman, M. (2005). An overview of the 100-car naturalistic study and findings. National Highway Traffic Safety Administration.
- 日本視覚学会. (2000). *運動知覚 視覚情報処理ハンドブック*: 朝倉書店.
- 野口薫 (1975). 道路交通に関する知覚研究の現状. *国際交通安全学会誌*, 1, 41-55.
- 大口敬. (2000). 高速道路単路部渋滞発生解析- 追従挙動モデルの整理と今後の展望-. *土木学会論文集*, 660, 39-51.
- 奥野昭宏 (1998). ドライバ視覚と運転支援技術. *電子情報通信学会技術研究報告 PRMU, パターン認識・メディア理解*, 98, 37-43.
-

- Oudejans, R. R., Michaels, C. F., Bakker, F. C., & Dolne, M. A. (1996). The relevance of action in perceiving affordances: perception of catchableness of fly balls. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22, 879-891.
- Osaka, N. (1988). Speed estimation through restricted visual field during driving in day and night: Naso-temporal hemifield differences. *Paper presented at the Vision in Vehicles II. Second International Conference on Vision in Vehicles*.
- Papakostopoulos, V., Marmaras, N., & Nathanael, D. (2017). The “Field of Safe Travel” revisited: Interpreting driving behaviour performance through a holistic approach. *Transport Reviews*, 37, 695-714. 10.1080/01441647.2017.1289992
- Perez, M., McLaughlin, S., Kondo, T., Antin, J., McClafferty, J., Lee, S., Hankey, J., & Dingus, T. (2016). Transportation safety meets big data: The SHRP 2 naturalistic driving database. *Journal of the Society of Instrument and Control Engineers*, 55, 415-421. 10.11499/sicejl.55.415
- Ranney, T. A. (1999). Psychological factors that influence car-following and car-following model development. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2, 213-219. 10.1016/S1369-8478(00)00010-3
- Reason, J., Manstead, A., Stradling, S., Baxter, J., & Campbell, K. (1990). Errors and violations on the roads: A real distinction? *Ergonomics*, 33, 1315-1332.
- Recarte, M. A., Nunes, L. M., & Lillo, J. (1996). Estimation of time to arrival in a real vehicle and in a simulation task: Effects of sex, driving experience, speed and distance. *Vision in vehicles*, 5, 135-144.
- Regan, D. (2002). Binocular information about time to collision and time to passage. *Vision Research*, 42, 2479-2484. [http://dx.doi.org/10.1016/S0042-6989\(02\)00086-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0042-6989(02)00086-X)
- 蓮花 一己 (2000). 運転時のリスクテイキング行動の心理的過程とリスク回避行動へのアプローチ. *IATSS Review*, 26, 12-22.
- Rockwell, T. H. (1972). Skills, judgment and information acquisition in driving. *Human Factors in Highway Traffic Safety Research*, 133-164.
- Saffarian, M., Happee, R., & Winter, J. D. (2012). Why do drivers maintain short headways in fog? a driving-simulator study evaluating feeling of risk and lateral control during automated and manual car following. *Ergonomics*, 55(9), 971-985.
- Sato, T., & Akamatsu, M. (2015). Headway distances of elderly drivers: Longitudinal study over one decade. *Presented at 19<sup>th</sup> Triennial Congress of the International Ergonomics Association*. Melbourne
-

- 成波, 谷口哲夫, 波多野忠, 松島和男 (2005a). 追従走行時のドライバ挙動に関する研究. 交通安全環境研究所報告, 1-11.
- 成波, 谷口哲夫, 波多野忠, 松島和男 (2005b). 運転動機から見たドライバの車間設定挙動. 自動車技術会論文集, 36, 247-252.
- Semb, G. (1969). Scaling automobile speed. *Perception & Psychophysics*, 5(2), 97-101. doi:10.3758/BF03210530
- Serafin, C., & McLaughlin, S. B. (1998). Acc human factors issues - results of evaluations. *Technical Paper FISITA*.
- Sidaway, B., Fairweather, M., Sekiya, H., & McNitt-Gray, J. (1996). Time-to-collision estimation in a simulated driving task. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 38, 101-113.
- Sivak, M. (1996). The information that drivers use: Is it indeed 90% visual? *Perception*, 25, 1081-1089. 10.1068/p251081
- Snider, J. (1966). The detection threshold for changes in headway. *Report No EES202B-4, Ohio State Univ.*
- Stevens, S. S. (1957). On the psychophysical law. *Psychological Review*, 64, 153-181. 10.1037/h0046162
- Stevens, S. S. (1961). To honor fechner and repeal his Law. *A power function, not a log function, describes the operating characteristic of a sensory system*, 133, 80-86. 10.1126/science.133.3446.80
- Stoner, H. A., Wiese, E. E., & Lee, J. D. (2003). Applying ecological interface design to the driving domain: The results of an abstraction hierarchy analysis. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (pp. 444-448). Vol. 47. SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA.
- 鈴木桂輔, 菊地一範, 片山硬 (2003). 自動車運転中のシチュエーションウェアネスの評価手法に関する考察. 自動車研究, 25, 319-322.
- 谷口実 (1983). 高速道路の車間距離(資料)(人間・車・環境). 自動車技術, 37, p518-523.
- 友野貴之, 古山宣洋, 三嶋博之 (2017). 人はいかにして人と人の間を通り抜けられると判断するのか? — 間隙アフォーダンス知覚の新たな展開. 認知科学, 24, 435-449. 10.11225/jcss.24.435
- Torf, A. S., & Duckstein, L. (1966). A methodology for the determination of driver perceptual latency in car following. *Human Factors*, 8, 441-447. 10.1177/001872086600800508
- Treat, J. R., Tumbas, N., McDonald, S., Shinar, D., & Hume, R. D. (1977). Tri-Level study of the
-

- causes of traffic accidents. Volume I: Casual factor tabulations and assessments.
- Van Winsum, W., & Heino, A. (1996). Choice of time-headway in car-following and the role of time-to-collision information in braking. *Ergonomics*, 39(4), 579-592.  
doi:10.1080/00140139608964482
- Wagner, H. (1982). Flow-field variables trigger landing in flies. *Nature*.
- Warren, W. H. (1984). Perceiving affordances: Visual guidance of stair climbing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 10, 683.
- Warren, W. H. (1995). Constructing an econiche. *Global perspectives on the ecology of human-machine systems* (pp. 210-237). CRC Press.
- Warren, W. H., Jr., & Whang, S. (1987). Visual guidance of walking through apertures: Body-scaled information for affordances. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 13(3), 371-383.
- Wilde, G. J. (2009). *Risk homeostasis: Theory, evidence and practical implications*.
- World Health Organization (2018). Global status report on road safety 2018.
- 谷田公二, 松永勝也 (2006). 車間時間に関するドライバーの時間知覚の精度についての研究. *交通心理学研究*, 22, 1-9.
- Yamamura, T., & Kuge, N. (1996). Following vehicle driver's behavior characteristics with the emergency braking advanced advisory system in the situation of sudden braking. *Intelligent Transportation: Realizing the Future Abstracts of the Third World Congress on Intelligent Transport Systems*.
- Yilmaz, E. H., & Warren, W. H. (1995). Visual control of braking: A test of the tau hypothesis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(5), 996.
- Zhou, H., & Itoh, M. (2016). How does a driver perceive risk when making decision of lane-changing? *IFAC-PapersOnLine*, 49, 60-65.