HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	道路と連携した自動走行の高度化に向けたドライバの認知行動特性に関する基礎的研究
Author(s)	和田, 脩平
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14881号
Issue Date	2022-03-24
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k14881
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/85331
Type	doctoral thesis
File Information	Wada_Shuhei.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

道路と連携した自動走行の高度化に向けた
ドライバの認知行動特性に関する基礎的研究

Fundamental Study on the Driver's Behavior Characteristics
for the Advancement of Automated Driving Connected with Transport Systems

和田　脩平

北海道大学大学院工学院

2022 年 2 月

論文の内容の要旨

自動運転車両が様々な場面で安全・快適に走行するには，車両では直接センシングできない先読み情報となる交通信号・交差車両・歩行者/自転車・緊急車両・気象・路面状況などを取得することが必要となる．先読み情報を活用した自動運転の走行が実現すれば，状況に合わせた車両制御が可能となり，ドライバが自動運転システムに割り込まなくなりかつ安全・安心な自動運転システムの利用範囲が広がる．しかし，このような道路に関係する先読み情報と自動運転車が協調する取り組みは始まったばかりであり，どのような取り組みが望ましいかなど具体的に明らかにされた事象は多くはない．本論文では，自動運転時のドライバの認知行動特性をベースに，道路と連携した自動走行の高度化に資する基礎的な検討を行っている．

本論文は 6 章から構成されており，各章の内容は以下のとおりである．

第 1 章では，本論文の背景に関する自動運転レベルの定義，自動運転の意義，実用化に向けた制度の整備など，自動運転の枠組みを述べている．また，協調 ITS，自動走行のための空間的情報，デジタルツインや路車間通信の活用など，道路と連携した自動走行の高度化に必要となる要素を述べている．これらの背景から道路と連携した自動走行の高度化に関する課題について取り上げ，研究目的を自動走行時のドライバの周辺認知状況と冬期をターゲットとした自動走行可能領域の拡大としたことについて詳細に述べている．

第 2 章では，道路と連携した自動走行の高度化に関係する既存研究を整理している．最初に自動走行の定義・自動走行に関係する法制度・自動走行の進化・自動走行のメリットなどに関する文献を整理している．次に，自動運転レベル 1 からレベル 3 における課題点として，ドライバの周辺認知行動とオーバーライド（ドライバが自動運転を停止し，ドライバによる運転を行うこと）の関係に関する文献をレビューしている．特に自動走行に使われるシステムとドライバの協調とその課題に関する文献をレビューしている．最後に，冬期における自動運転の課題となるドライバの危険感に関係する心理的側面とリスクの顕在化を示す指標として衝突余裕時間（Time-To-Collision，以降 TTC）に関する文献をレビューしている．

第 3 章では，自動運転レベル 2 を利用した高速道路走行時の一般ドライバと高齢ドライバの周辺認知状況を分析している．一般ドライバ 15 名と高齢ドライバ 15 名が高速道路を自動運転レベル 2 で運転したときとドライバによる運転をしたときの周辺認知状況に関する評価を行った．周辺認知に対する主観評価，目線による周辺確認行動，合流部でのオーバーライドの特徴から，高齢ドライバは主観的な安全確認の意識が一般ドライバに比べ高いが，実際の周辺認知状況は低かった．一般ドライバは周辺認知状況が高齢ドライバに比べて高いが，周辺の交通状況への意識の維持が難しいという懸念を抱いていた．周辺認知状況の低下は走行中に発生するリスク事象への準備状態(readiness level)の低下につながる．準備状態が低下した状態で走行を続ければ，高速道路の合流部・分流部・事故区間・本線

料金所などで起きるリスク事象への対応が遅れ，対応の遅れから事故の発生が懸念される．道路側からの合流部などの情報提供を事前に行い，周辺認知状況の低下がリスクの顕在化に至らないような協調が必要なことを示している．

第 4 章では，乾燥路面における Adaptive Cruise Control System（以降，ACC）の設定条件（車間時間）がドライバの危険感に与える影響を示し，それを再現するモデルを提案している．高速道路での走行実験と MATLAB Simulink を利用した ACC による追従走行時のシミュレーションを行っている．乾燥路面の高速道路において先行車減速時のドライバの主観的危険感（以降，RF (Risk Feeling)）と TTC の変化を走行実験から計測している．先行車減速時の TTC 最小値の逆数を説明変数として，RF を推定するモデルを定式化した．また，実車走行実験の先行車減速時の結果から，ACC に関するパラメータを推定した．これにより，実車走行を再現した ACC による走行がシミュレーションできるようになった．前述の RF を推定するモデルを適用し，RF が高まりやすいイレギュラーな追従状況において，ドライバが ACC に介入しないために必要な ACC の設定条件（車両側）を示している．一方，道路側からは，工事などによる車線規制区間の開始地点・高速道路上の事故地点・故障車の地点など，イレギュラーな車両の錯綜が起きることが想定される事象に関する情報提供が必要なことを示している．

第 5 章では，冬期路面における ACC の走行速度・車間時間設定による適応条件について検討している．適応条件を決める指標としてドライバの危険感を利用している．ドライバの危険感が高まりオーバーライドしないよう，圧雪路面における ACC の車間時間・速度設定に関する適応条件を明らかにした．自動運転の使用は気象状況や路面状況による利用機能制限が大きい．特に，冬期間における自動運転の利用は制限されている．運転疲労軽減や走行の安全性向上などのメリットを考えたとき，冬期道路環境に適応した自動運転に対する期待は大きい．冬期道路環境での自動運転の走行を可能とするためには，冬期道路環境での自動運転の適応条件を明らかにする必要がある．第 4 章で示した手法を応用し，雪氷路面としたテストコースでの走行実験結果を用いて，雪氷路面における ACC を用いた走行の追従シミュレーションを再現し，RF を推定するモデルを提案している．先読み情報として冬期において路面状況を自動運転車に提供することのメリットを検討するときに有用となる．

第 6 章では，本論文の成果として自動運転走行時のドライバの周辺認知状況低下が高速道路合流部などのリスクの顕在化に与える影響，ドライバが ACC 走行に感じる危険感モデル，冬期路面における ACC の走行速度・車間時間設定による適応条件に関する知見をまとめ，自動走行の拡大に向けた道路側による支援や仕組みを議論し，道路と連携した自動走行の高度化に関する方向性を示している．

道路と連携した自動走行の高度化に向けた
ドライバの認知行動特性に関する基礎的研究

目　　次

第 1 章　序論 1

1.1　自動運転システムの枠組み 1

1.1.1　自動運転レベルの定義 1

1.1.2　自動運転の意義 4

1.1.2.1　交通事故の削減 4

1.1.2.2　人の移動支援としての自動運転 5

1) 地方部 5

2) 都市部 6

1.1.2.3　物の移動支援としての自動運転 7

1.1.3　自動運転実用化に向けた制度の整備 8

1.2　道路と連携した自動走行 10

1.2.1　協調 ITS 10

1.2.2　自動走行のための空間的情報 10

1.2.3　路車間通信による自動走行 10

1.2.4　デジタルツインによる道路と自動運転の連携 11

1.2.5　自動運転とドライバの協調への道路による支援 12

1.3　自動運転とドライバの協調の課題 14

1.3.1　自動運転時の情報処理プロセス 14

1.3.2　周辺認知行動の低下 15

1.3.3　ドライバの危険感 17

1.4　本研究の目的 19

1.5　本研究の構成 20

第 2 章　自動運転システム利用時のドライバの認知行動特性 23

2.1　自動運転システム作動下のドライバの認知行動 23

2.1.1　自動運転システムの走行から完全手動運転に変遷する際のドライバ行動 23

2.1.2　自動運転システム利用時のドライバの周辺認知状況 24

2.1.2.1　自動運転システム利用による周辺認知状況の低下 24

2.1.2.2　自動運転システム利用時のドライバによる反応の遅れ 25

2.1.2.3　周辺認知状況への加齢の影響 26

2.1.3　自動運転システム作動下のドライバの認知行動に関するまとめ 27

2.2　追従走行下での先行車両との追突に対するドライバの危険感　28
2.2.1　「危険」に関する概念の整理　28
2.2.2　ドライバの先行車両との追突への危険感と TTC の関係　28
2.2.3　冬期道路環境における自動運転　30

第 3 章　自動運転レベル 2 利用時ドライバの周辺認知行動への影響　31
3.1　はじめに　31
3.2　実験方法　33
3.2.1　実験参加者　33
3.2.2　実験走行環境　33
3.2.3　実験車両　34
3.2.4　計測　35
3.2.4.1　自動運転レベル 2 とドライバ運転の区間平均速度　35
3.2.4.2　実験車周辺の交通状況の記録　35
3.2.4.3　合流部における合流車両への対応の計測　35
3.2.4.4　ドライバの主観評価　35
3.2.4.5　ドライバの眼の映像を用いた後方認知行動の計測　37
3.2.4.6　キャリブレーション　38
3.2.5　実験手順　38
3.2.5.1　実験説明　38
3.2.5.2　練習走行　39
3.2.5.3　実験走行　39
3.3　結果　40
3.3.1　自動運転レベル 2 とドライバ運転の走行速度　40
3.3.2　合流車両の有無　40
3.3.3　合流部における合流車両への対応の結果　41
3.3.4　主観評価値の結果　42
3.3.4.1　自動運転レベル 2 の機能に関する主観評価の結果　42
3.3.4.2　自動運転レベル 2 の作動方法や動作状態に関する主観評価の結果　44
3.3.4.3　周辺認知行動に関する主観評価の結果　45
1)　自動運転レベル 2 とドライバ運転の比較　45
2)　一般ドライバと高齢ドライバの比較　48
3)　自動運転レベル 2 の周辺認知行動に関する主観評価の個人別分析　48
3.3.4.4　主観評価に関するまとめ　50
3.3.5　ミラー注視行動の結果　51
3.3.5.1　自動運転レベル 2 とドライバ運転の比較　51

1) 右サイド及びルームミラーの注視頻度 51
2) 右サイド及びルームミラーの注視時間 52
3.3.5.2 一般ドライバと高齢ドライバの比較 53
1) 右サイド及びルームミラーの注視頻度 53
2) 右サイド及びルームミラーの注視時間 54
3.3.5.3 ミラー注視時間割合に関する個人別分析 55
1) 計測結果 55
2) ミラー注視時間割合の個人別分析 56
3.3.5.4 ミラー注視行動の結果に関するまとめ 59
3.4 まとめ 61

第 4 章 先行車両減速場面での ACC 走行によるドライバの危険感への影響 65
4.1 はじめに 65
4.2 実車実験の方法 66
4.2.1 実車実験の目的 66
4.2.2 実験参加者 66
4.2.3 実車実験の日時と走行コース 66
4.2.4 実験条件 67
4.2.4.1 追従走行の方法 67
4.2.4.2 先行車両の減速区間 67
4.2.5 計測 67
4.2.5.1 先行車両減速場面での追突に対する主観的な危険感 67
4.2.5.2 走行速度及び車間距離の計測 67
4.2.5.3 ACC の作動状況の記録 68
4.2.5.4 実験設計 68
4.2.5.5 実験手順 69
4.3 実車実験の調査結果 70
4.3.1 データ取得結果 70
4.3.2 RF の結果 70
4.3.3 先行車両減速時の追従状況に関する基礎データ 71
4.3.4 TTC の最小値と THW との関係 72
4.3.5 $1/TTC_{min}$ を指標としたドライバの危険感のモデル化 72
4.3.6 実車実験のまとめ 73
4.4 先行車両減速場面を対象とした ACC 車両による追従走行シミュレーション 74
4.4.1 シミュレーション方法 74
4.4.2 時定数の推定 76

4.4.2.1　時定数の推定方法　76
4.4.2.2　推定した時定数　77
4.4.3　TTC_{min} のシミュレーション値と実測値との比較　78
4.4.4　ACC による追従走行シミュレーション　79
4.4.4.1　シナリオとパラメータ　79
4.4.4.2　ACC 車両による追従走行シミュレーション結果　80
1)　THW と 1/TTC の関係　80
2)　ACC の車間時間設定を考慮した THW-1/TTC の予測　81
4.5　先行車両減速場面での ACC 走行によるドライバの危険感の推定　82
4.5.1　各車間時間設定における RF の推定　82
4.5.2　RF 増大に起因した ACC への介入を回避する車間時間設定の検討　83
4.6　まとめ　84

第 5 章　危険感に基づいた冬期道路環境への ACC の設定に関する適応条件　86
5.1　はじめに　86
5.2　実車実験の方法　88
5.2.1　実車実験の目的　88
5.2.2　実験参加者　88
5.2.3　実車実験の日時と走行コース　88
5.2.4　実験条件　89
5.2.4.1　3 種類の ACC の車間時間設定　89
5.2.4.2　2 種類の先行車両による減速　89
5.2.4.3　2 種類の走行速度　89
5.2.5　計測　89
5.2.5.1　RF の計測　89
5.2.5.2　走行速度及び車間距離の計測　89
5.2.6　実験設計　90
5.2.7　実験手順　90
5.3　実車走行実験の結果　91
5.3.1　データ取得結果　91
5.3.2　RF の計測結果　91
5.3.3　$1/TTC_{min}$ と RF の関係　93
5.3.4　$1/TTC_{min}$ を指標とした RF のモデル化　94
5.3.5　実車走行実験のまとめ　94
5.4　先行車両減速場面を対象とした ACC による追従走行シミュレーション　95
5.4.1　シミュレーション方法　95

5.4.2　時定数の推定　95
5.4.2.1　時定数の推定方法　95
5.4.2.2　時定数の推定結果　96
5.4.3　TTC_{min} のシミュレーション値と実測値との比較　97
5.4.4　ACC による追従走行シミュレーション　98
5.4.4.1　シナリオとパラメータ　98
5.4.4.2　ACC による追従走行シミュレーション結果　99
1)　THW と 1/TTC の関係　99
2)　ACC の車間時間設定を考慮した THW-1/TTC の予測　100
5.5　乾燥路面及び圧雪路面における RF の推定　102
5.5.1　各車間時間設定・走行速度における RF の推定　102
5.5.2　RF 増大に起因した ACC への介入を回避する車間時間設定の検討　104
5.6　まとめ　106

第 6 章　結論　108
6.1　本論文の成果　108
6.1.1　周辺認知状況低下が高速道路合流部のリスク顕在化に与える影響の知見　108
6.1.2　ドライバが ACC 走行に感じる危険感の知見　109
6.1.3　冬期路面における ACC の走行速度・車間時間設定の知見　110
6.1.4　まとめ　111
6.2　今後の課題　113

謝辞　114

参考文献　115

第 1 章　序論

1.1　自動運転システムの枠組み

1.1.1　自動運転レベルの定義

SAE J 3016 は、米国自動車技術者協会（：SAE (Society of Automotive Engineers) International）が無償公開している自動運転の規格である [1)]。SAE J 3016 は、運転自動化システムが作動している間、ドライバが存在する場合、その役割を明確にすること、法規・方針・基準標準を策定するときの適応範囲についての疑問に答えること、運転自動化の仕様や技術要件の有益な枠組みを提供することに対して有用であることから、自動運転レベルを定義している。表 1-1 は、日本の公益社団法人自動車技術会が、英文（原文）による SAE J 3016 の自動運転レベルの定義を日本語に翻訳したものである（公益社団法人自動車技術会, 2018）[2)]。SAE J 3016 は、自動運転レベルを 0〜5 までの 6 段階に分類している。本論文では、各々の自動運転レベルで用いられる自動運転技術をシステムと呼ぶ。

レベル 0（自動運転システムなし）：ドライバによる従来通りの運転である。アクセル・ブレーキ・ステアリング操作などの持続的な縦横の車両運動制御及び対象物・事象検知・反応（Object and Event Detection and Response（以降、OEDR））といった動的運転タスク（Dynamic Driving Task (以降、DDT)）は、全てドライバが行う。予防安全システムによって支援されている場合も含んでいる。

レベル 1：レベル 1 では、運転自動システムは、DDT の縦方向または横方向のいずれか（両方同時ではない）における車両運動制御のサブタスクを特定の限定領域において持続的に実行する。OEDR は、ドライバが担当する。持続的な縦横の車両運動制御は、システムとドライバが協調して行う。DDT の作動継続が困難な場合への応答は、ドライバが担当する。自動運転レベル 1 での代表的なシステムは、Adaptive Cruise Control (以降、ACC)や Lane Keeping Assistant System (以降、LKAS)である。

レベル 2（部分自動運転）：自動運転システムは、DDT の縦方向及び横方向両方における車両運動制御のサブタスクを特定の限定領域において持続的に実行する。OEDR は、ドライバが担当する。持続的な縦横の車両運動制御は、システムが行う。DDT の作動継続が困難な場合への応答は、ドライバが担当する。ACC と LKAS を同時に作動させた場合に自動運転レベル 2 相当の走行が可能となっている。

レベル 3（条件付運転自動）：自動運転システムは、全ての DDT を限定領域において持続的に実行する。この際、作動継続が困難な場合への応答準備ができている利用者は、ほかの車両のシステムにおける DDT 実行システムに関連するシステム故障だけでなく、自動運転システムが出した引継ぎ要請（以降、RTI：Request To Intervene）を受け入れ、適切に応答することが要求される。

レベル 4（高度自動運転）：自動運転システムは、全ての DDT 及び作動継続が困難な場合への応答を限定領域において継続的に実行する。作動継続が困難な場合、利用者が介入

の要求に応答することはない。

レベル 5（完全自動運転）：自動運転システムは、全ての DDT 及び作動継続が困難な場合への応答を持続的かつ無制限に実行する。作動継続が困難な場合、利用者が介入の要求に応答することはない。

レベル 4 やレベル 5 の高度・完全自動運転が走行可能となるまでの間、レベル 1 から 3 までの準自動運転領域の車両がメインとなって高速道路（自動車専用道路）や一部の幹線道路を走行する。自動運転レベル 1 から 3 の領域においては、ドライバと自動運転とが混合した運転形態となる。これは今までにない運転形態であり、新たな交通事故リスクを引き起こすといった指摘がある。

レベル 1 または 2 では、ドライバは、先行車両との急接近、合流車両との接近、工事区間による車線数の減少、IC 出口・料金所手前などの状況に応じて、自動運転のシステムを OFF にする必要がある。このような、自動運転からドライバ運転に戻るドライバ行動は、オーバーライドと呼ぶ。「道路運送車両法」の細目でもオーバーライドが定義されている。オーバーライドは、自動運転レベル 2 までの領域においてドライバの快適性や安全性を確保する上で重要な運転行動の一つである。レベル 1 や 2 のようなドライバと自動運転とが混合した運転形態においては、円滑なオーバーライドが重要となるため、ドライバの周辺認知状況（Situational Awareness）や準備状態（Readiness）の維持が不可欠となる。

レベル 3 におけるドライバへの DDT の引継ぎでは、システム限界やシステムエラーが発生しうる地点の手前で、システムは RTI（Request To Intervene：SAE　J3016 2016 年版）の操作引継ぎ要請の警告をドライバに与える。OEDR に関する義務は、システムにあるが、引継ぎ対象は、ドライバであるため、ドライバの準備状態の維持は、自動運転レベル 3 にとっても重要となっている。OEDR の義務は、システムにあるため、自動運転レベル 3 では RTI 時、ドライバが RTI の状況を即座に理解できるための HMI（Human Machine Interface）が必要であると考えられる。

レベル 3 の社会実装を可能とするため、国土交通省は、2020 年 4 月施行の改正道路運送車両法保安基準対象装置に自動運行装置を追加した。これに付随する形で、自動運行装置の作動状態の確認に必要な情報を記録する作動状態記録装置も設置が義務付けられている。作動状態記録装置については、「動運行装置の作動中に運転者が、かじ取装置又は制動装置若しくは加速装置の操作装置への操作によりオーバーライドした時刻」について、特定可能な情報を保存できることが求められている。ここで言うオーバーライドの定義は、「自動運行装置の作動中における、当該装置による前後方向及び横方向の制御に優先し、運転者の操作により車両が制御されること」である。現状の法律（道路運送車両法）においては、レベル 3 を前提に自動運転システムから優先的に手動運転を行い、車両を制御することをオーバーライドと位置付けている。手動運転から自動運転システム、あるいは自動運転システムから別の自動運転システムへの移行は対象とされていないが、近い将来、

レベル 4 を解禁する法改正が行われた際にこのオーバーライドの定義も拡大されるものと思われる。

表 1-1　運転自動化レベルの概要（公益社団法人　自動車技術会（2018）：自動運転用運転自動化システムのレベル分類及び定義 JASO TP 18004 における p19 から抜粋）

レベル	名称	定義（口語表現）	動的運転タスク		動的運転タスクの作動継続が困難な場合への応答	限定領域
			持続的な横・縦の車両運動制御	対象物・事象の検知及び応答		
運転者が一部又は全ての動的運転タスクを実行						
0	運転自動化なし	運転者が全ての動的運転タスクを実行。（予防安全システムによって支援されている場合も含む）。	運転者	運転者	運転者	適用外
1	運転支援	運転自動化システムが動的運転タスクの縦方向又は横方向のいずれか（両方同時ではない）の車両運動制御のサブタスクを特定の限定領域において持続的に実行。 この際，運転者は残りの動的運転タスクを実行する事が期待される。	運転者とシステム	運転者	運転者	限定的
2	部分運転自動化	運転自動化システムが動的運転タスクの縦方向及び横方向両方の車両運動制御のサブタスクを特定の限定領域において持続的に実行。 この際，運転者は動的運転タスクのサブタスクである対象物・事象の検知及び応答を完了し、システムを監督する事が期待される。	**システム**	運転者	運転者	限定的
自動運転システムが（作動時は）全ての動的運転タスクを実行						
3	条件付運転自動化	運転自動化システムが全ての動的運転タスクを限定領域において持続的に実行。 この際，作動継続が困難な場合への応答準備ができている利用者は、他の車両のシステムにおける動的運転タスク実行システムに関連するシステム故障だけでなく，自動運転システムが出した介入の要求を受け容れ，適切に応答することが期待される。	システム	**システム**	作動継続が困難な場合への応答準備ができている利用者（代替中ドライバになる）	限定的
4	高度運転自動化	運転自動化システムが全ての動的運転タスク及び作動継続が困難な場合への応答を限定領域において持続的に実行。 作動継続が困難な場合，利用者が介入の要求に応答することは期待されない。	システム	システム	**システム**	限定的
5	完全運転自動化	運転自動化システムが全ての動的運転タスク及び作動継続が困難な場合への応答を持続的かつ無制限に（すなわち，限定領域内ではない）実行。 作動継続が困難な場合、利用者が介入の要求に応答することは期待されない。	システム	システム	システム	**限定なし**

注記　このテクニカルペーパの運転自動化システムレベルは，規定というよりはむしろ説明的かつ参考であり，また法律的というよりむしろ技術的なものである。複数の要素は，各レベルの最大というよりも最小の能力を示す。この表で，“システム”は，適宜，運転自動化システム又は自動運転システムを意味する。

1.1.2　自動運転の意義

1.1.2.1　交通事故の削減

2021 年（令和 3 年）3 月 29 日、内閣総理大臣を会長とする中央交通安全対策会議は、世界一安全な道路交通の実現を目指し、第 11 次交通安全基本計画を決定した（内閣府, 2021）[3]。第 11 次交通安全基本計画は、2025 年（令和 7 年）までに年間交通事故死者数を 2,000 人以下、年間重症者数を 22,000 人以下とすることを目標としている。警察庁の道路交通事故に関する統計データ（2021）によると、2020 年（令和 2 年）の交通事故発生件数は、309,178 件、負傷者数は 369,476 人、重症者数は 27,774 人、死者数は 2,839 人であった [4]。近年の交通事故件数、死者数、重症者数、死傷者数などは、2004 年（平成 16 年）をピークに年々減少している（図 1-1）。

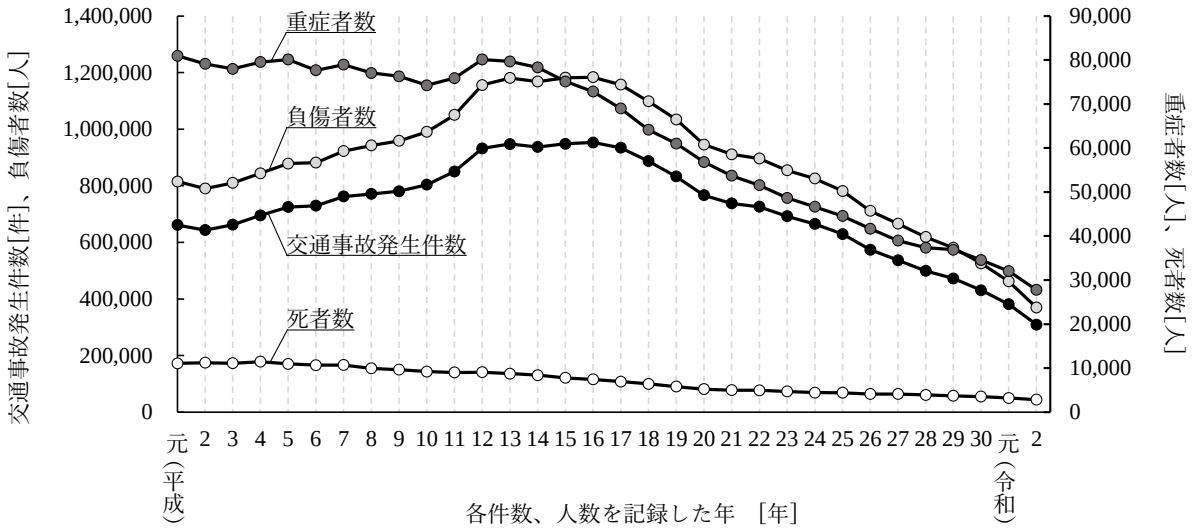


図 1-1　道路交通事故による交通事故発生件数、負傷者数、重症者数及び死者数の推移

交通事故は、ドライバによるヒューマンエラーが原因となって発生しているものが大半である。令和元年度版交通安全白書（2020）[5]は、死亡事故発生件数の 95%がドライバの違反、5%が歩行者やその他に起因していることを報告している。令和 2 年中の交通事故発生状況の（警察庁, 2021）[6]を見ると、2020 年の原付以上のドライバの法令違反による交通事故件数は、288,995 件であった。そのうちの 72.3%は、安全運転義務への違反が原因となっていた（運転操作不適：6.3%、漫然運転：8.0%、脇見運転：13.4%、動静不注視：10.4%、安全不確認：32.2%、安全速度：0.4%、その他：1.5%）。安全運転義務違反が総交通事故件数に占める割合は、過去 10 年間であまり変化はない（図 1-2）。事故の大半は、ドライバの過失、すなわちヒューマンエラーによるものである。道路交通事故の削減には、ドライバのヒューマンエラーへの対策が重要となっている。

第 6 期先進安全自動車（ＡＳＶ）推進計画成果報告における「自動運転システムの事故削減効果評価の検討」（国土交通省, 2020）[7]は、次に記述するような自動運転による事故回

避効果をまとめている。自動運転は、センサー検知範囲が広く長いことによって、ドライバの見落としをカバーする。自動運転は、交通法規を守り、一時停止規制が有る場面で自動停止、周辺監視しながら徐行で発進、信号・速度規制を遵守するといったドライバによる違反をカバーする。自動運転は、危険な運転はせず、規制がない場面でも周辺監視しながら徐行で発進あるいは通過、無理な右左折や U ターン、走行車線からの逸脱、後続車がいる場合の後退事故はないといったドライバの不適な操作をカバーする。

運転の自動化は、安全運転義務を順守してドライバの運転操作や認知機能の支援となることから、ヒューマンエラーの防止に対して有効と考えられる。

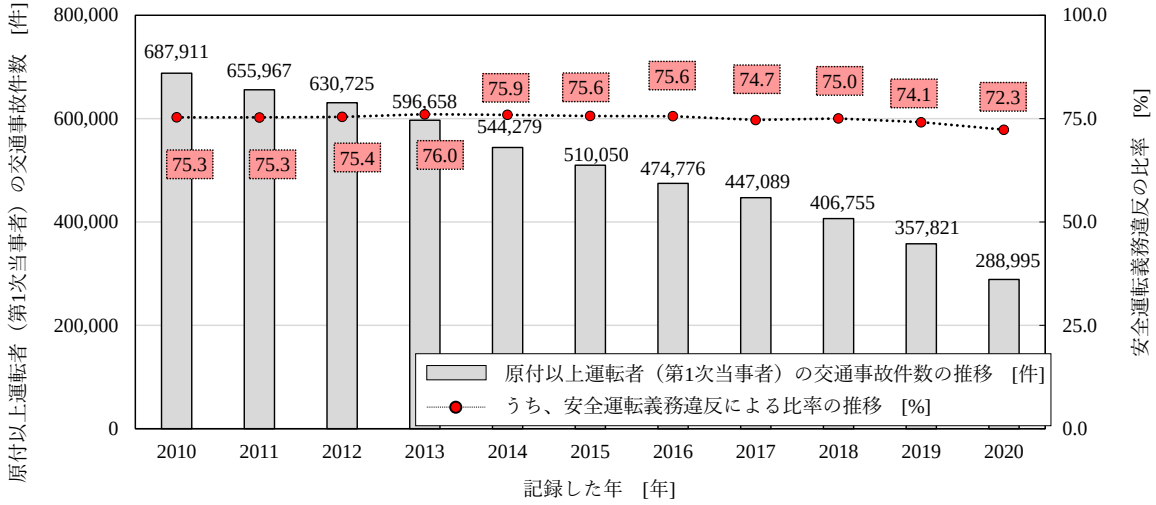


図 1-2　原付以上運転者（第 1 当事者）の交通事故件数とうち安全運転義務違反の比率の推移

1.1.2.2　人の移動支援としての自動運転

1)　地方部

人口減少や都市部への人の移動によって、地方部の公共交通利用者は、減少している。地方部での公共交通の維持は、難しい状況となっている。今後、住民の高齢化と共に高齢ドライバの運転免許返納が進むと考えられ、今まで自家用車で移動していた高齢者への移動手段の確保が課題となっている。

高齢者などの移動手段の確保対策とし、経済産業省は、「スマートモビリティ実証」として、ラストマイル用自動運転の開発と実証実験に取り組んでいる。現在、北海道から沖縄までの全国 14 の地方部において実証実験を行っている [8]（経済産業省, 2021）。国土交通省は、「中山間地域における道の駅等を拠点とした自動運転サービス」にて、4 種類の自動運転車両を用いた実証実験を行っている [9]（国土交通省, 2021）。これらの施策が進むことから、2030 年に向けて、遠隔監視による低速走行での自動運転レベル 4 の実現が期待される。

2020年11月から、ソフトバンクの自動運転サービス子会社のボードリーは、茨城県境町内の 20[km]区間で定時・定路線の自動運転バスを運行している。運用しているバスの自動運転レベルは、2 であり、ドライバと遠隔監視の二人体制で走行している。自動運転バスの運賃は、無料であり、土日も運行を行っている。2021 年 8 月、自動運転バスの停留所は、16 箇所である。自動運転バス運用当時の境町は、鉄道駅がなく路線バス網も不十分、高齢ドライバや自転車が多いといった地方都市に共通した交通課題を抱えていた。自動運転バスの路線は、高速バスターミナルや人気の観光施設にも接続しており、町民の移動の利便性が高まっている。課題として、自動運転バスは、赤信号での停止・路上駐停車の回避などに対応していない。そのような状況では、いつもドライバが介入することで対応している。今後、ドライバを必要としないハイレベルな自動運転バスを運用するためには、自動運転システムは、信号機の現示情報や駐停車・事故区間等の情報を受信し走行する仕組みが必要となる。

実証実験や民間の取り組み等が近年盛んに行われてきており、地方部でのモビリティを確保する手段として自動運転を組み込むことが現実的となってきた。今後、自動運転はコミュニティバスやカーシェアリング、都市間バス・電車への移動手段、車両を活用した小売や医療サービスなどに活用される。デマンド交通やマルチモーダル型の自動運転サービスを活用して免許を持たない高齢者が移動できるようになり、地方部における高齢者の移動や生活の質を維持する効果があると考えられている[10]（大前, 2018）。

2） 都市部

人口密度が高い都市中心部は、交通渋滞や公共交通の混雑といった交通の混雑が課題となっている。人口集中による自家用車を使用する交通参加者の増加は、渋滞を悪化させる要因となる。交通渋滞の悪化は、交通事故の増加やバスの利便性低下に繋がる。電車・地下鉄・バスなどが集約できるキャパシティを超えた利用者数によって混雑した公共交通は、快適性や効率性に課題が残っている。都市部では交通サービスの快適性・効率性・利便性が求められている。

現在、自動運転レベル 3 や 4 相当の走行を可能とした車両による移動サービスが試験的に行われている。横浜市みなとみらい及び中華街エリアでは、日産自動車が自動運転レベル 3 相当の車両によるオンデマンド配車サービスの実証実験を 2021 年 9 月から始めている。ホンダは、ゼネラルモーターズ（GM）や GM 子会社と連携し 2020 年代半ばを目標に自動運転レベル 4 による走行を可能とした車両によるライドシェアサービスを実現するために実証実験を行っている。対象となる走行区間におけるデジタルマップを実証実験から作成しそれを基に自動運転レベル 4 の走行が行われる予定である。

都市部での自動走行は、走行環境が動的に変化することから（歩行者の存在、信号、路駐停車、工事区間）、自車のセンシングのみで安全に走行するには限界がある。そこで、車両は、都市・道路からの情報を受信する、または都市・道路が車両に情報を発信する仕

組みが必要となる。このような仕組みを検討するために、トヨタは、ウーブンシティと名付けた実験都市を静岡県裾野市に現在建設中である。歩行者の動き・降雨の情報・周辺車両の状況などは、道路や信号機、ビルなどに設置したセンサーやカメラ、携帯電話からの情報によって取得する。取得した大量のデータは、光通信網やデータセンター、クラウドを通じて処理し、実際の都市全体のデジタルイメージを形成する。自動運転車両がデジタルイメージを受信しながら走行する仕組みの検討は、都市部でのより安全で持続的な自動走行に貢献する。

今後、上記のような自動運転車両は、駅、商業施設、医療機関などの移動目的地と連携し、ライドシェアやバスとして活用される。人々の移動が束ねられ、公共交通の混雑や交通量の削減、移動の効率化が見込まれる。さらに、多様な交通モードの乗り換え拠点（モビリティ・ハブ）の整備や自動運転の配車から料金支払いまでを一元的に行えるサービスの構築を進めることで、移動者のニーズに応じて複数の交通手段を組み合わせた、シームレスな移動が実現すると考えられる。

1.1.2.3　物の移動支援としての自動運転

物流需要の増加・高齢化に伴って、モノの移動が重要である一方で、トラックのドライバが不足していることが現在課題となっている。ドライバ不足により一人当たりのドライバへの負担が大きく、長時間運転し続けなければならないなど厳しい労働条件にあり、人材が集まらなくなっている。

トラックに自動運転のシステムを搭載することによる物流サービスの向上として高速道路でのトラックの隊列走行が検討されている。2022 年までトラックの後続車無人隊列走行システムが構想されている。このシステムは、先頭車以外の後続車は無人であるため、後続車も含め先頭車の運転者の責任で運転する。後続車は電子牽引技術により先頭車に追従し、車間維持、速度調整、車線維持、車線変更をしながら無人で走行する。2025 年以降は自動運転レベル 4 のトラックの市場化も視野に入れて検討されている。

これにより、ドライバ一人当たりで運ぶことのできる物量が多くなり、物流の効率化が期待できる。また、物流中継拠点から配送先のラストマイル物流において、自動運転車や小型の自動走行型ロボットを活用することが考えられている。一か所の中継拠点から様々な方向に物を運んでゆく際にそれぞれ自動運転車や小型の自動走行型ロボットが使用され、配送効率が向上するとともに、トラック等のドライバ不足の解消につながる。数百キロに及ぶ長距離輸送も、トラックの隊列走行技術などの開発が進んでおり、ドライバの負担軽減にも効果的である。これらは民間や国によってすでに実証実験が行われており、2030 年を目途に実用化されていくことが期待されている。

1.1.3　自動運転実用化に向けた制度の整備

国土交通省によるＡＳＶ技術普及状況調査（2019）より、ADAS の乗用車への装備率は年々上昇している [11]。2010 年の段階では、およそ 4,000[千台]の乗用車生産台数に対して Adaptive Cruise Control (ACC)や Lane Keeping Assistant System (LKAS)及び衝突被害軽減ブレーキの装備率は全て 5%未満であった。一方、2019 年には、およそ 4,500[千台]の乗用車生産台数に対して ACC の装備率は 70%以上、LKAS は 30%以上、衝突被害軽減ブレーキは 85%以上となっていた。ACC や LKAS が乗用車へ標準的に装備されていることで自動運転レベル 1 や 2 相当の走行がドライバにとって身近になってきた。

2020 年 11 月には、本田工業株式会社が申請したレジェンドに対し、国土交通省はレベル 3 の自動運行装置を備えた車両として世界初の型式指定を実施した。自動運転レベル 3 による走行が可能となったレジェンドは 2021 年 3 月から発売開始している(HONDA ニュースリリース, 2021) [12]。レジェンドは複数の機器によって周辺の交通状況などをセンシングし車両制御を決定している。レジェンドの車両には、前方：カメラ、2 つの Lidar、2 つの中距離ミリ波レーダー、長距離ミリ波レーダー、後方：3 つの Lidar、2 つの中距離ミリ波レーダー、車両上端：GNSS 受信機がそれぞれ搭載されている。センシング機能の向上やそれを活用した車両制御の高精度化により、自動走行は、レベル 3 まで可能となってきている。

自動運転の実用化に向けて、各省庁が法律を改正し自動運転の走行に関する制度の整備を進めている。2020 年 4 月、条件付き自動運転レベル 3 の実現に対応するため、警察庁は道路交通法第 2 条 13 の 2 で自動運行装置の定義を追加した。自動運転と手動運転が混在する新しい運転状況となることから、同庁は道路交通法 2 条 17 における運転の定義を改正し、自動運行装置を使用した走行を運転と定義した。「運転」とは、「車両又は路面電車（以下「車両等」という。）をその本来の用い方に従って用いること（自動運行装置を使用する場合を含む。）」となった。走行中、自動運転に準ずる装置を使用する者に対して道路交通法上の運転者の義務を課すことが明確になった。

自動運転に準ずる装置を使用する者に対し道路交通法上の運転者の義務を課すことが明確になったことにより、自動運転レベル 3 を使用している際に起きた事故の責任は誰になるのかといった問題の検討がなされてきている。中川（2020）は上記の法律の改正を分析し、自動運転レベル 3 の操作引継ぎ時における交通事故の運転者の刑事責任について議論している [13]。従来のドライバの過失は結果予見可能性・結果予見義務の有無、結果回避可能性・結果回避義務の有無によって認定していた。自動運転レベル 3 の過失の認定への課題である、何をもって結果予見可能だったと認定し、どこを起点として回避可能な時間があったかといった点について中川は考察している。中川は使用条件を満たさなくなった時点または保安基準を満たさない時点での Request To Intervene (RTI)の操作引継ぎ要請の警告を起点とすることで、自動運転レベル 3 の過失の認定を考察できることを示している。

2020 年 4 月、運輸省は道路運送車両法の改正法を施行し、保安基準対象装置に自動運行装置を追加した。道路運送車両法第 41 条第 2 項には自動運行装置の使用条件に関する規定

を設けた。道路交通法第 71 条の 4 の 2 第 1 項は自動運転レベル 3 の自動運行装置を搭載している車両の運転手による使用条件外での自動運行装置の使用を禁止している。道路運送車両の保安基準における第 48 条 15 の 2 では「次に掲げる場合において、自動運行装置が作動しないものであること。イ：走行環境条件を満たしていない場合、ロ：自動運行装置が正常に作動しないおそれがある場合」と自動運転の保安基準を明確に示している。

本論文で着目した道路運送車両の保安基準は上記の「ロ」である。北海道のような移動距離が長い地方の積雪寒冷地において、自動運転は移動の支援やドライバの運転操作支援・運転負荷軽減の面から重要である。冬期道路で走行中、視界や路面の状況が悪化する場面がある。自車のセンシングのみで制御判断する自動運転ではそのような状況で正常に作動しないおそれがあり、保安基準に適合しない状況が発生しうる。北海道のような積雪寒冷地で自動運転が使用可能となるには、該当地域において自動運転が確実に作動するような仕組みまたは自動運転の速度や車間時間設定に関する新たな規制が必要であると考えられる。

1.2　道路と連携した自動走行

1.2.1　協調 ITS

ITS（Intelligent Transport Systems：高度道路交通システム）は、人と道路と車両の間で情報の受発信を行うシステムである。ITS は事故・渋滞・環境対策などの道路交通が抱える課題の解決に貢献する。国土交通省国土技術政策総合研究所（2015）は、自動車と道路管理者のそれぞれが保有する情報の相互連携・補完により、双方にとってメリットをもたらすような次世代の路車協調システムとして、協調 ITS による自動運転の実現に向けた取り組みを行っている [14]。取り組みの中で、車両における CAN（Controller Area Network）、カメラ、各種センサ等の自動車から得られる情報と渋滞、事故、落下物、工事規制等の道路側から得られる情報とを通信によって連携することで、協調 ITS を実現する試みが検討されている。

自動運転車両がより安全・快適に走行するには、交通信号に関する情報、ドライバの目線で捉えられない車両や歩行者の存在、緊急車両の接近、道路の規制情報、気象情報、路面情報、事故区間などの情報をあらかじめ取得するための通信が有用であると考えられている（このような情報群を以降、先読み情報と呼ぶ）。先読み情報を活用した自動運転の走行が実現すれば、車線変更や車間時間・走行速度の設定調整の自動化、HMI（Human Machine Interface）によるオーバーライドや RTI の円滑化などが期待できる。協調 ITS は、今まで困難とされていた高速道路における車両錯綜部、気象や道路状況が厳しい場面、イレギュラーな追従状況での走行への適応に寄与する取り組みであると考えられる。

1.2.2　自動走行のための空間的情報

路面・視界情報以外にも工事・事故による通行規制などの位置情報や交通量などのダイナミックな情報と高精度 3 次元地図データ（HD マップ）とを組み合わせたデジタルマップであるダイナミックマップも自動運転にとって重要な先読み情報となる。現時点ではダイナミックマップ基盤株式会社がダイナミックマップを管理しており、上下線合わせて 3 万[km]以上の高速道路・自動車専用道路のデータをカバーしている。同株式会社は、2024 年に一般道路を含めた約 13 万[km]をカバーする計画を打ち出している。渡辺ら（2015）は交通社会ダイナミックマップについて提案し、その概要を述べている [15]。渡辺らが提案した交通社会ダイナミックマップが扱う情報は、道路情報、道路上の物体に関する静的情報、動的情報、予測情報であり、都市レベルでの道路交通の安全性向上や効率化、個別最適化のための基盤システムとして交通に関するセンサーデータの効率的な収集・管理・活用を支援するものである。

1.2.3　路車間通信による自動走行

V2X（Vehicle to everything）は、車両同士での車車間通信（Vehicle-to-Vehicle：V2V）、あるいは道路情報と自動車との路車間通信（Vehicle-to-roadside-Infrastructure ：V2I）によって

、自車センシングでは捉えられない車外データを取得できる無線通信システムである。動的に変化する交通状況の把握や自車のセンシングの範囲外での情報が取得できる。そのため、V2X の有効活用は、安全な走行を可能とする（菅沼, (2021)）[16]。V2X は自動運転レベル 4 や 5 などの完全自動運転のみならず、レベル 1〜3 までの準自動運転領域に対しても重要な技術である。現在までに、V2X の通信の規格化・標準化も進んできている（Intelligent Transport Systems (ITS)(2013) [17, 18]; 牧野ら(2013) [19]）

V2V を使用した ACC 走行として知られているのが協調型車間距離制御装置(Cooperative Adaptive Cruise Control)（以降、CACC）である。今までの ACC は先行車両が減速するようなイレギュラーな追従走行状況には対応していなかった。先行車両との通信によって CACC はイレギュラーな追従走行に対応できるようになる。CACC によって、先行車両が減速し始めた瞬間に自車は減速制御を始めることができる。これは、アクセル操作などに対しても同様である。先行車両のアクションに対してタイムラグのない追従走行が可能となり、CACC は事故の削減や渋滞緩和などに対し有効的であると考えられている。

現在、V2X におけるアーキテクチャやシステムの提案、実証実験などに関する研究は数多く存在する（例えば、S.Guni ら(2017) [20]; A.S. Julio ら(2015) [21]; S. Kato ら(2002) [22]; L. Hobert ら(2015) [23]）。いずれの研究も V2X によって自動運転の安全や快適性が改善されるといった視点をもっている。一方で、道路側が自動運転車両の車間時間や速度設定の規制を情報として自動運転側に与える際、具体的にどのような基準で規制を決定し、どのように走行を制御すればよいのかといった指針となる研究は多くない。

松林ら(2016) [24]は、ACC が搭載されたドライビングシミュレータを用いた実験を行い、運転支援装置に対する理解や違和感が人と装置が協調することに対して重要な役割を担っていることを示した。Beggiano ら(2015) [25]は、長期の実道路における運転を通じて ACC の受容と信頼性に関する研究を行い、システムの限界の提示が ACC の適切な利用に重要と指摘している。自動運転による車両制御がドライバの想定した走行と乖離している場合、自動運転に対するドライバの信頼感が低下し、自動運転の使用促進を妨げてしまうと考えられる。そのため、自動運転が道路側もしくは先行車両から情報を受け取った場合、その後の車両制御はドライバの感性に従っている必要があると考えられる。

1.2.4　デジタルツインによる道路と自動運転の連携

現在、日産の「ProPILOT2.0」やホンダの「Honda SENSING Elite」はダイナミックマップを活用している。例えば、ACC は、道路構造を読み取り、カーブ区間手前で減速しながら走行する。ダイナミックマップがカバーする道路は、2024 年に向けてさらに拡大していく。今後、ダイナミックマップや先読み情報を活用する自動運転の走行は、主流となると考えられる。

道路ネットワークにおける工事・事故状況、路面・気象状況・交通容量・速度規制等の情報を受け取りながら自動運転は、最適な走行経路や走行方法を決定する。この際、自動

走行を支えるシステム群（道路・都市の支援システム、車両の搭載システムなど）は、現実の道路ネットワークの先読み情報を基に幾つかの走行シナリオをサイバー環境上でシミュレーションする。シミュレーションの結果は、現実の自動運転による走行方法の決定を支援する。自動運転車両は、サイバー環境と現実世界とで相互にフィードバックを行いながら走行することが考えられる。

このように現実世界をサイバー上に再現して、高度な調停、制御を行うデジタルツインは、次世代の通信時代におけるリアルタイムなデータを活用した手法の一つとして注目されている（山中, 2021）[26]。デジタルツインは、現実世界で取得したデータを仮想環境にもフィードバックし、仮想環境におけるモデルの精度を高めることで現実世界と仮想環境がより近づき、さらに高度なシミュレーションが可能になることが特徴（四方ら, 2019）[27]である。現実の状況とデジタルな空間をツインで考えるデジタルツインの導入は、自動運転の走行方法を決定する上で有効となる。

例えば、レベル 2 の自動運転が工事・事故区間、分合流部、路面凍結などの走行環境に直面し、自車のセンシングのみで対応する状況を想定する。自動運転による挙動がドライバの想定と乖離する場合、ドライバは、その違和感や危険感から自動運転に介入する。デジタルツインを活用することで、工事・事故区間、分合流部、路面凍結などの任意の地点におけるドライバの想定（感性）に合った自動運転の走行が検討できる。ドライバの介入が減り持続的走行に寄与することで、自動運転の走行可能領域が広がると考えられる。

1.2.5　自動運転とドライバの協調への道路による支援

現行のレベル 1～3 の自動運転が走行できる場面を増やすためには、道路・ドライバ・自動運転による相互協調型の走行を可能とすべきである。道路側は、自動運転に対しての先読み情報提供や自動運転の速度・車間時間設定に関する規制を設けて走行を支援する。それを受ける自動運転車両は、ドライバの想定に沿う車両挙動を取り、HMI を介してドライバへ道路や車両の情報を共有する。ドライバは、道路状況や自動運転の挙動の結果を道路側や自動運転側に返し、フィードバックする。このような相互連携によって自車のセンシングのみでは対応しきれない走行環境に適応していく必要がある。

課題としては、先行車両が減速するようなイレギュラーな追従走行、冬期や前方の状況が不明確な区間（合流部、工事、事故、トンネル出口など）での走行である。このようなシーンに自動運転車両が直面する際の安全な走行を担保する仕組みは、まだ確立できていない。道路側は、自動運転に対して行う支援をどのような視点や指標から導いていくかという方式を検討する必要がある。

道路側が自動運転の走行を支援するとき、それに従った自動運転による車両挙動がドライバの想定した走行と乖離している場合、違和感や危険感からドライバの自動運転に対する信頼が低下する。そこで、道路側と自動運転の協調した走行の検討に際し、自動運転とドライバの協調の課題に関する知見が重要であると考えられる。自動運転が道路側もしく

は先行車両から規制・支援情報を受け取った場合、その後の車両挙動は、ドライバに違和感や危険感を与えないことが望ましい。道路側は、そういったドライバの感性や認知行動特性を考慮した自動運転への支援の方式を構築することが必要である。

1.3　自動運転とドライバの協調の課題

1.3.1　自動運転時の情報処理プロセス

自動運転時の情報処理プロセス（5つのステップ）を図1-3に示した。ステップ1～3は、自動運転システムとドライバが認知判断するための入力データ（知覚）を示している。ステップ1・2は、測位（GNSS)、高精度3次元地図データである。自車は、時空間情報や地図の取得を随時行う。ステップ 3 は、自動運転システムとドライバが認知判断するための知覚データの取得である。自動運転システムとドライバが認知判断するための知覚データは、自車のセンサー・道路との連携・ドライバの視覚の3パターンがある。ステップ4は、車両内部を示している。自動運転システムは、車両周辺の走行環境の認知と車両制御の判断を行う。自動運転システムの運転タスクの割合が増えることで、ドライバの周辺認知行動が低下すること、システムへの危険感が生じる場面があることを示している。ステップ5は、ステップ4の自動運転システム・ドライバによる判断を基に、自動運転システムまたはドライバが動的車両運動制御を行う（応答、操作)。

市街地における完全自動運転が確立されるまで、自動運転レベル2、3相当の車両が高速道路（自動車専用道路）を中心として走行する。道路側は、高速道路での自動走行が持続的となるようにドライバと自動運転の双方を支援する。支援のために、道路側は、高速道路上でドライバが自動運転を使用する際の課題に関する知見が必要となっている。ドライバが自動運転を使用する際の課題は、自動運転システム利用時の周辺認知行動の低下と危険感がある。2つの課題の詳細は、次の 1.3.2 項と 1.3.3 項で述べる。

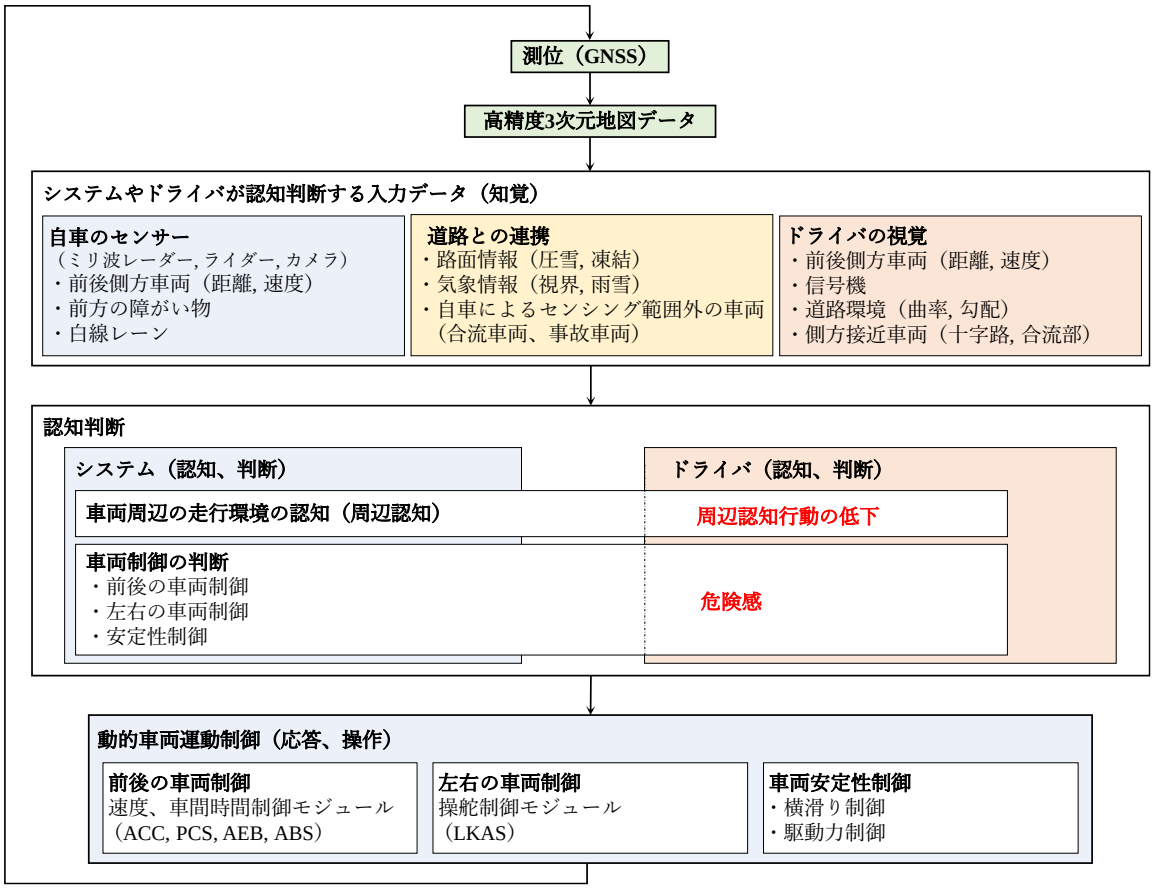


図 1-3　自動運転時の情報処理プロセス

1.3.2　周辺認知行動の低下

ドライバは、認知・判断を自動運転レベル 1~2 では常時、レベル 3 ではシステムによる警告時に行う。レベル 1～2 のドライバによる介入はオーバーライド、レベル 3 のドライバによる運転の引継ぎは RTI という。介入が必要な場面に直面する数秒手前で、オーバーライドや RTI が終了している状況が理想的である。そのためには、ドライバが走行環境や自動運転システムを即座に正しく認知・理解することが不可欠である。

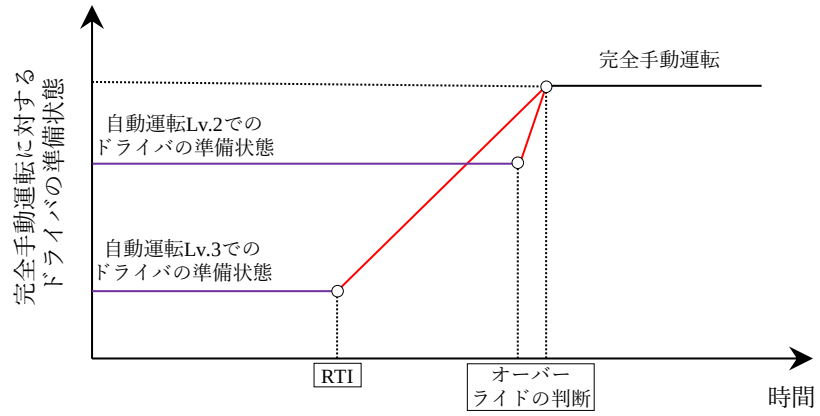
自動運転レベル 1 または 2 では、運転中の OEDR に関する義務はドライバにある。システムを作動している間、ドライバは、システム状態や先行車両との急接近・合流車両との接近・工事区間による車線数の減少・IC 出口・料金所手前などの周辺の交通状況を適切に認知し、いつでも完全手動運転（ドライバ運転）の状態に戻れるように準備する必要がある（準備状態：Readiness）。

自動運転レベル 3 では OEDR に関する義務は、システムにあるが、引継ぎ対象は、ドライバである。そのため、ドライバの準備状態の維持は、自動運転レベル 3 にとっても重要となっている。自動運転レベル 3 におけるドライバへの DDT の引継ぎでは、システム限界やシステムエラーが発生しうる地点の手前で、システムは、RTI（Request To Intervene）の

操作引継ぎ要請の警告をドライバに与える。自動運転レベル 3 では RTI 時、ドライバの完全手動運転に対する準備状態がレベル 2 よりも低下する。ドライバが RTI の状況を即座に理解できるための HMI が必要となっている（図 1-4)。

自動運転レベルが高くなるにつれ、システムが運転操作や OEDR を担当する割合は、増えていく。ここで、ドライバが自動運転を過信し運転を頼り切ってしまうと、完全手動運転に対する準備状態は、低下する。準備状態の低下に伴い、ドライバの周辺認知状況は、低下する。ここでいう周辺認知状況は、ドライバの周辺認知を構成する総合的な意識や行動のことである。その要因は、ドライバの視覚による認知行動、目でとらえた情報を認知するための意識、確認行動への意欲などである。自動運転レベル 2 や 3 を利用することで周辺認知行動に対する意識が低下することが明らかになっている（例えば、de Winter, J.C.F. (2019, 2014) [28, 29], Y. Chung-san (2014) [30], L. Petersen ら(2019) [31])。本間（2015）は、自動運転レベル 2 を使用した場合、システムへの過信によりドライバの周辺認知行動が低下し、新たな事故リスクの要因となる可能性を示唆している [32]。M.R.Endsley ら（1995）は、ドライバが自動運転を使用した時にドライバの心理状態が能動的から受動的に変化するためにドライバの周辺認知行動が低下すると報告している [33]。周辺認知状況の低下によって、ドライバは、走行環境や自動運転システムの認知・理解が難しい状態となる。システムや道路側は、ドライバが走行環境や自動運転システムの認知・理解を正しく行えるように HMI を通じて支援する必要がある。

一方で、周辺に自車以外の車両が存在する供用中の高速道路にて、自動運転を使用中のドライバは、どのような周辺認知行動が主観的・客観的に低下しているのか、周辺認知行動の低下による影響が高速道路合流部でどのようにドライバ行動として現れるのか、その加齢の影響についての検討は多くない。加齢や主観的・客観的な周辺認知行動の低下がドライバ行動に与える影響に関する知見は、道路側による自動走行への必要な支援を明らかにする面で重要である。



※赤松幹之（2018）：「自動運転時代のHMIの課題」を参考

図 1-4　自動運転レベル 2 や 3 における完全手動運転に対するドライバの準備状態の低下

1.3.3　ドライバの危険感

レベル 3 までの自動運転が追従走行する際に作動している代表的システムは、Adaptive Cruise Control (ACC)である。ACC は、同一車線上に存在する先行車両との車間時間をセンサーから計測し、ドライバが選択した ACC の車間時間の設定以下にならないように速度を制御するシステムである（ISO, 1999）[34]。ACC は自動運転を実現する上で重要なシステムである。

ACC による走行の課題は、以下である。

- ACC は最大で 0.3g までの減速しか行わない。自車が先行車両と急接近する場面のような追従状況には対応していない（伊藤, 2008 [35]；H. U. Ahmed ら, 2021 [36] ）。
- 自車が先行車両と急接近する追従シーンで、ACC の設定（車間時間・速度）に付随した減速挙動がドライバの想定と乖離していた場合、ドライバは危険を感じて ACC に介入する。介入が頻発すると、ドライバは、ACC に不信感を抱く。そのため、自車が先行車両と急接近する場面のような追従状況における ACC の設定や挙動は、ドライバが理解できるような（感性に合うような）ものである必要がある。
- 現在市販されている ACC は、自車のセンシングのみを操作の判断材用とする（先行車両との相対速度・車両距離、前方の障害物）。自車がセンシングできないような車外データ（路面情報や気象情報など）が必要となる区間の走行に対して、ACC は適応していない。（一部、最新の ACC はカーブ区間の情報を使用しているケースがある）
- 冬期道路環境での自車が先行車両と急接近する場面のような追従状況に対し、どのような ACC の走行条件が必要になるか明らかになっていない。運転疲労軽減や走行の安全性向上などのメリットを考えたとき、冬期道路環境に適応した自動運転に対する期待は大きい。

上記に対応するために、各自動車会社が ACC のシステムを改善することは、走行の精度

を高めるうえで重要である。一方で、自車のセンシングの限界といった課題が存在する以上、安全な走行には自車のセンシングだけでは捉えられないデータも必要となるため、道路側による支援が必要である。道路側の支援として考えられるのは、ACC 作動下のドライバが危険と感じる様な状況をダイナミックマップや先読み情報から取得し、システムに提供することである。その情報に応じて、ACC は、車間時間や走行速度を自動で変更できるようにする。このような道路とシステムが連携する仕組みは、ACC の走行領域拡大に寄与すると考えられる。

道路側が ACC の走行を支援する際、ACC 使用時のドライバの危険感に関する知見は重要である。一方、イレギュラーな追従走行の中で、ドライバが危険と感じずに走行できる ACC の設定（車間時間・走行速度）はわかっていない。この知見は、ドライバによる ACC への介入の予防あるいは危険感の低減のために必要な ACC の設定を検討できる。これを応用することで、冬期道路環境でドライバが危険と感じない様な ACC の設定を検討できる。

1.4　本研究の目的

市街地における自動運転レベル 5 が確立されるまで、自動運転レベル 2・3 相当の車両が高速道路（自動車専用道路）を中心として走行する（自動運転の過渡期)。自動運転レベル 5 が安定的に運用可能となるには（自動運転の安定期)、道路と連携した自動走行の高度化、すなわち、図 1-3 に示すプロセスを確実に回すことが重要となる。1.3 節に示すような「完全手動運転に対するドライバの準備状態」と「追従走行時の先行車両との追突に対する危険感」の 2 つのドライバ認知行動特性に関する課題は、自動運転の持続的走行に向けた道路側による支援や仕組みを議論する上で重要である。

周辺に自車以外の車両が存在する供用中の高速道路にて、自動運転レベル 2 を使用中のドライバは、どのような周辺認知行動が主観的・客観的に低下しているのか、周辺認知行動の低下による影響が高速道路合流部でどのようにドライバ行動として現れるのか、その加齢の影響についての検討は多くない。加齢や主観的・客観的な周辺認知行動の低下がドライバ行動に与える影響に関する知見は、道路側による自動走行への必要な支援を明らかにする面で重要である。

自車が先行車両と急接近する追従状況で、ドライバが危険と感じずに走行できる ACC の設定（車間時間・走行速度）はわかっていない。この知見は、ドライバのオーバーライド予防あるいは危険感の低減のために必要な ACC の設定を検討できる。これを応用することで、冬期道路環境でドライバが危険と感じない様な ACC の設定に関する適応条件を検討できる。

そこで、本研究の目的は以下とする。

1) 周辺に自車以外の車両が存在する供用中の高速道路にて、ドライバが自動運転レベル 2 を使用中、どのような周辺認知行動が主観的・客観的に低下し、周辺認知行動の低下による影響が高速道路合流部でどのようにドライバの行動として現れるのかという点、その加齢の影響について明らかにする。その結果から、合流部で必要となる道路側による自動運転・ドライバへの支援について検討する。
2) 圧雪路面における ACC 走行中の先行車両減速と車間時間・速度設定がドライバの主観的な危険感に与える影響を明らかにする。その結果から、ドライバが ACC への介入を起こさないような、圧雪路面における ACC の車間時間・速度設定に関する適応条件について明らかにする。
3) 1)と 2)から明らかとなる知見を基に、自動運転の持続的走行に向けた道路側による支援や仕組みを議論する。

1.5　本論文の構成

本論文は、全6章で構成する。その構成は、図1-5の通りである。以下、本論文を構成する各章について、その要約を述べる。

第 1 章では、本論文の背景及び目的について述べている。第一に、自動運転レベルの定義、自動運転の意義、実用化に向けた制度の整備など、自動運転の枠組みを述べている。第二に、協調 ITS、自動走行のための空間的情報、デジタルツインや路車間通信の活用、自動運転とドライバの協調など、道路と連携した自動走行の高度化に必要となる要素を述べている。最後に、道路と連携した自動走行の高度化に向けた、自動運転とドライバの協調による課題について取り上げ、本研究の目的について述べている。

第 2 章では、本論文に関連したドライバの認知行動特性に関する既存研究を整理する。第一に、第 3 章へと着想するための自動運転レベル 1 や 2 における課題点として、オーバーライドとドライバの周辺認知行動を取り上げる。第二に、第 4 章から第 5 章で使用する指標である衝突余裕時間（以降、TTC (Time-To-Collision)）や、先行車両との追突に対するドライバの危険感の基本的な考え方を整理する。

第 3 章では、自動運転レベル 2 利用時の周辺認知行動へ影響及び合流部付近で発生するオーバーライド状況について検証する。自動運転レベル 2 の利用による主観的・客観的な周辺認知行動への影響を明らかにするために、高速道路で走行実験を行う。一般ドライバ15名と高齢ドライバ15名が自動運転レベル2と自動運転レベル2を使用しない運転で走行した結果を示す。周辺認知行動に関する主観評価値、後方車両への認知行動としてミラー注視行動、合流部周辺でのオーバーライド発生状況について計測し、各年齢グループ間・各運転タイプ間で比較する。周辺に自車以外の車両が存在する供用中の高速道路にて、ドライバが自動運転レベル 2 を使用中、どのような周辺認知行動が主観的・客観的に低下し、周辺認知行動の低下による影響が高速道路合流部でどのようにドライバの行動として現れるのかという点、その加齢の影響について明らかにする。その結果から、合流部で必要となる道路側による自動運転・ドライバへの支援について検討する。

第4章では、先行車両の減速と ACC の車間時間設定が追従車両を運転するドライバの主観的な危険感に与える影響について明らかにする。先行車両減速時のドライバの主観的危険感（以降、RF (Risk Feeling)）と TTC を計測するために、高速道路にて走行実験を実施する。先行車両減速時の TTC 最小値の逆数を説明変数として、RF をモデル化する。実車走行実験で計測する TTC を基に、ACC による追従走行シミュレーション用のパラメータを設定する。ACC による追従走行シミュレーションは、ACC の車間時間と先行車両の減速度を設定する際の TTC 最小値を予測する。走行実験から得る RF のモデルと ACC の追従走行シミュレーションから得る TTC 最小値を使用して、ACC の車間時間と先行車両の減速度を設定する際の RF を推定する。先行車両減速時の ACC の車間時間設定が RF に与える影響を明らかにする。その結果から、ドライバが ACC への介入を起こさないような、ACC の車間時間設定について検討する。第 4 章の知見は、RF が高まりやすいイレギュラーな追従状

況において、ドライバが ACC に介入しないために必要な車間時間設定を検討できる。第 5 章へと続く冬期道路環境での ACC の車間時間や速度設定の適応条件を知ることに有用である。

第 5 章では、第 4 章で述べた先行車両減速時の ACC による車間時間設定が RF に与える影響に関する検討を応用し、圧雪路面における ACC 走行中の先行車両減速と車間時間設定が RF に与える影響を明らかにする。本章では、その結果から、冬期路面における ACC の走行速度・車間時間設定による適応条件について検討する。現在の自動運転の使用限界は気象状況や路面状況による機能制限が大きな要因である。運転疲労軽減や走行の安全性向上などのメリットを考えたとき、冬期道路環境に適応した自動運転に対する期待は大きい。冬期道路環境での自動運転の走行を可能とするためには、冬期道路環境での自動運転の適応条件を明らかにする必要がある。ACC は運転の自動化を実現するための重要な技術であり、冬期道路環境への ACC の適応条件を知ることは、快適・安全な自動運転を冬期道路環境に導入するための足掛かりとなる。第 4 章と第 5 章における知見は、ドライバの危険感増大や ACC への介入を防ぐために、道路側が道路の先読み情報に基づいて発令する自動運転への速度や車間時間の設定規制の決定に対して有用である。

第 6 章では、第 3 章から第 5 章が明らかにする「自動運転レベル 2 利用時の主観的・客観的な周辺認知行動低下が高速道路合流部のオーバーライドに与える影響」、「圧雪路面における ACC 走行中の先行車両減速と車間時間設定が RF に与える影響」の知見をまとめる。まとめた結果から、自動運転の持続的走行に向けた道路側による支援や仕組みを議論する。最後に、今後の研究を発展させる方向を述べる。

道路と連携した自動走行の高度化に向けたドライバの認知行動特性に関する基礎的研究

第1章　序論

・自動運転システムの枠組み：自動運転レベルの定義、意義、制度の整備
・道路と連携した自動走行　：協調ITS、空間的情報、デジタルツイン、路車間通信
・道路と連携した自動走行の高度化に向けた自動運転とドライバの協調による課題抽出
・本研究の目的

第2章　自動運転利用時のドライバの認知行動特性に関する既往研究

・自動運転利用時のドライバ行動　　：オーバーライド、RTI
・自動運転利用時のドライバの認知状況　：完全自動運転に対する準備状態（周辺認知状況）
・追突に対するドライバの危険感　　：RF、RFとTTCとの関係
・冬期道路環境における自動走行

第3章　自動運転レベル2利用時のドライバの周辺認知行動への影響

・はじめに：背景・目的
・実験方法：周辺認知行動（主観評価値、ミラー注視行動）、合流部でのオーバーライドの計測
・実験結果：計測結果の年齢グループ間・運転タイプ間での比較、個人分析
・合流部で必要となる道路側による支援の検討

第4章　先行車両減速場面でのACC走行によるドライバの危険感への影響

・はじめに：背景・目的
・実験方法：RF、先行車両減速時のTTCの計測
・実験結果：TTC最小値によるRFのモデル化、シミュレーションによるTTC最小値の予測
　車間時間と減速度を設定した際のRFの推定
・オーバーライドを抑制するような車間時間設定の検討

第5章　危険感に基づいた冬期道路環境へのACCの適応条件

・はじめに：背景・目的
・実験方法：乾燥・圧雪路面におけるRF、先行車両減速時のTTCの計測
・実験結果：第4章の方法論を適用した路面状態別のRFの推定
・圧雪路面でのオーバーライドを抑制するような車間時間・走行速度設定の検討
　→危険感に基づいた冬期道路環境へのACCの車間時間・走行速度設定の適応条件の検討

第6章　結論

・本研究の成果
・道路と連携した自動走行の高度化に向けた議論（自動運転の持続的走行）
・今後の課題

図 1-5　本論文の構成

第 2 章　自動運転システム利用時のドライバの認知行動特性

2.1　自動運転システム作動下のドライバの認知行動

2.1.1　自動運転システムの走行から完全手動運転に変遷する際のドライバ行動

先行車両との急接近、合流車両との接近、工事区間による車線数の減少、IC 出口・料金所手前などで状況に応じてドライバは、自動運転レベル 1 や 2 のシステムを OFF にする必要がある。このような、自動運転からドライバ運転に戻るドライバ行動は、オーバーライドと呼ぶ。オーバーライドは、自動運転レベル 3 の RTI とは違い、必ずしも警告があるわけではない（RTI は警告あり）。ドライバが周辺状況とシステムを監視し、自らの判断で介入する。オーバーライドの例は、カーブ前後・先行車両や合流車両との接近に対してブレーキを踏み足す、車線数の減少が起こる手前での車線変更、障害物回避の際にハンドルを切り足すなどである。自動運転レベル 1 や 2 のような、ドライバと自動運転とが混合した運転形態においては、円滑なオーバーライドが重要となる。介入が必要な場面に直面する数秒手前で、オーバーライドが終了している状況が理想的である。

自動運転レベル 2 を使用するドライバのオーバーライドを計測した研究がある。高橋ら（2019）[37]は、自動運転レベル 2 に対する事前の教示方法が、供用中の高速道路において自動運転レベル 2 を使用するドライバのオーバーライド状況に与える影響を明らかにしている。実験参加者の条件は、自動運転レベル 2 の使用経験がないドライバであった。実験参加者数は、60 歳以下の 20 名（男女半々）であった。対象とした延長 28.1[km]の実験走行コースの走行環境は、合流・分流 11 箇所、曲線半径 460[m]以下のカーブが右 14 箇所、左 19 箇所であった。実験参加者への教示は、実験参加者 7 名に「安全に関する注意のみ（教示 C）」、実験参加者 7 名に「教示 C に走行環境に対する意識づけを追加（教示 SI）」、実験参加者 6 名に「教示 SI に HMI への意識づけを追加（教示 HMI）」を与えた。高橋らは、実験参加者がブレーキによるオーバーライドを行った回数を計測した。結果として、ドライバのオーバーライド発生回数は、教示 C を与えた実験参加者群に比して、教示 SI 及び教示 HMI を与えた実験参加者群の方が高くなっていた。追加的教示を与えたドライバは、自動運転レベル 2 の動作に積極的に介入するようになった。J. Lee ら（1992）[38]は、「自動化システムの使用頻度は必ずしもシステムに対する信頼と一致するものではなく、システム使用に対する自信が伴わないと、操作者は自動化システムの利用を控えマニュアル操作を選択する」と述べている。高橋らは、実験結果における追加的教示によるオーバーライド発生頻度の増加には、J. Lee らの指摘した現象が観察されているものと解釈している。

高橋らによる研究は、ドライバの自動運転システムの理解度とオーバーライドの関係を示した。ドライバが自動運転システムの限界を知り、オーバーライドを正しく選択することは、安全な自動運転の走行にとって重要である。一方で、高橋らの研究では、オーバーライドの原因がカーブなのか合流車なのかといった、オーバーライドの発生要因については分析されていない。自動運転の走行領域の拡大（自動運転の持続的な走行）に向けた道

路側の支援を検討する場合、オーバーライドの発生要因ついて知る必要がある。

発生要因の一つとして、自車が前方の車両と追突するリスクのある状況を想定し、オーバーライドを計測した研究が存在する。平岡ら（2020）[39]は、ACC 利用時におけるドライバの信頼感がオーバーライドに与える影響を明らかにしている。実験参加者数は、50 歳以下の 13 名（男性 11 名、女性 2 名）であった。実験参加者の 4 名は、ACC の機能まで知っており、9 名は ACC のことを全く知らなかった。平岡らは、ドライビングシミュレータ（以降、DS）上に、道路幅 3.6[m]、3 車線一方通行、延長 55[km]のテストコースを用意した。実験参加者は、速度設定を時速 100[km/h]、センサー範囲を車両先端から前方に 100[m]とした ACC によって、第一車線のみを走行した。走行開始から 18[min]ほどで、先行する大型トレーラーが減速した後に車線変更を行い、自車前方に停止車両が出現する。この状況で、実験参加者がオーバーライドして回避操作を行わないと停止車両と衝突する実験シナリオを作成している。平岡らは、ACC への信頼感に対する主観評価、ドライバの右足の位置、ブレーキによるオーバーライドを計測した。システムを完全に信頼しているドライバは、衝突を回避できず停止車両と衝突している結果となった。ドライバが衝突回避できていても、TTC は 2.6[sec]まで減少していた。平岡らは、ACC に対する信頼が高い場合に、ACC では対応できない危険な状況においてドライバの操作介入が遅れることを明らかにした。

平岡らが設定した停止車両との接近に関するシナリオの理想的な対応は、自動運転車両とドライバが事前に停止車両の情報を受け、それを認知し、HMI で連携を取ることで、ドライバと自動運転システムが齟齬なく操作を判断することであると考えられる。このような対応が可能となるには、準備状態や周辺認知状況の低下がオーバーライドに与える影響に関する課題を抽出し、オーバーライドが発生しうるような状況での道路側やシステム側からドライバへの支援を検討する必要がある。

2.1.2　自動運転システム利用時のドライバの周辺認知状況

2.1.2.1　自動運転システム利用による周辺認知状況の低下

本研究における周辺認知状況は、ドライバによる周辺の状況認識（Situation Awareness）や認識への意識、周辺状況を認知する行動や意欲を総合したものをいう。周辺認知状況の要因は、ドライバの視覚による認知行動、目でとらえた情報を認知するための意識、確認行動への意欲などである。運転中のドライバは、走行環境を知覚・認知することで状況を認識し、判断操作に繋げている。M. R. Endsley（1995）[33] は、状況認識プロセスを対象物の知覚（L1）、対象物の動き・位置関係・意味といった状況の理解（L2）、先の状態に対する将来予測（L3）といった 3 段階に分類して提唱した。M. R. Endsley はドライバが自動運転を使用した時にドライバの心理状態が能動的から受動的に変化するためにドライバの状況認識が低下すると考察した。

自動運転システムの利用がドライバの認知行動に対して影響を与えた結果、実際に事故

が発生したケースがある。複数のメディアは、自動運転レベル 2 相当の米テスラ社オートパイロットの車両が前方車両に追突した事故を報道している。2016 年以降で、オートパイロット作動中のテスラ車は、30件の追突事故を起こしている。二宮（2020）[40]は、「レベル 2 ではドライバは常時監視義務があるが、自動運転の完成度が上がり、介入頻度が下がると、システムへの過信が高まり、監視の履行は容易とは言えない。米テスラ社のシステムでの事故にはこの要因に関連するものがあると推察される」といった考察をしている。

システムが運転操作や OEDR を担当する割合は、自動運転レベルが高くなるにつれて増えていく。システムが OEDR を担当すると、ドライバはシステムの運転操作を頼りきってしまう。システムへの依存や過信が起きると、完全手動運転に対する準備状態の維持が難しくなる[41]（M. Blanco ら, 2015）。準備状態の低下に伴って、ドライバの周辺認知状況は低下する。本間（2015）[32]は自動運転システムを使用した場合、システムへの過信によりドライバの周辺認知状況が低下し、新たな事故リスクの要因となる可能性を示唆している。新たな事故リスクを引き起こさないために、または新たな事故リスクとは何かを明らかにするために、自動運転使用時のドライバの周辺認知状況に関する知見が必要である。

ドライバが自動運転システムを使用した際の周辺認知状況の低下を示唆する研究がある。de Winter ら（2014）[28]は、左右・前方の動きが自動化された自動運転、ACC 運転、ドライバ運転、3 つの運転タイプでの運転負荷と状況認識をメタ分析によって比較した。結果、左右・前方の動きが自動化された自動運転と ACC 運転は、ドライバの運転負荷を軽減する効果があった。一方で、ACC 運転と左右・前方の動きが自動化された自動運転ではドライバ運転に比べて状況認識が悪化することを示唆している。

de Winter らのメタ分析のレビュー対象となっている研究の多くは DS を用いたものであり、実走行環境での実験についてはほとんど記述されていない。そのほかの研究でも自動運転の使用が周辺認知行動に与える影響に関する分析は DS を使用したものが多い（例えば、B. Christian ら, 2017 [42]; L. Tyron ら, 2017 [43]; G. H. Walker ら, 2008 [44]）。DS による実験は、実験設計時に想定した特定のイベントをすべての実験参加者に同条件で実験可能であることがメリットである。一方で、事前にイベントを特定化せず、実際に市販されているシステムを使用して走行した場合に生まれる複数の課題を抽出する場合、実システムを搭載した実車実環境で実験することが望ましいと考えられる。周辺に自車以外の車両が存在する供用中の高速道路にて、自動運転レベル 2 を使用中のドライバは、どのような周辺認知行動が主観的・客観的に低下し、その影響がどのようにオーバーライドに影響を与えるのかといった課題を抽出した研究は多くない。

2.1.2.2　自動運転システム利用時のドライバによる反応の遅れ

合流車両・割り込み車両・停止車両などの自車前方に突然現れる車両を認知し、適切にオーバーライドを判断することは、周辺認知状況が低下したドライバには難しい。実際に、ACC を使用するドライバは、ドライバ運転に比べて様々な状況への反応が遅れることを示

す研究がある。Brown and Parker（2004）[45]は、ACC 使用時のドライバが先行車両のブレーキランプへの反応が遅れることを明らかにしている。テストトラックで、実験参加者 18 名がドライバ運転と ACC 走行で先行車両を追従した。追従走行中に先行車両がブレーキランプを 3 回点灯させるイベントを用意した。実験参加者には、先行車両のブレーキランプに気づいたらすぐにブレーキペダルを踏むように指示していた。先行車両のブレーキランプ点灯開始～ドライバのブレーキ踏み込みまでの時間差から、先行車両のブレーキランプへの反応を計測した。ACC 運転での先行車両のブレーキランプへの反応は、ドライバ運転に比べ有意に遅くなっていた。ACC 走行中の前方への割り込み車両に対しても、ブレーキ操作への判断遅れを示す研究[46]がある（A. F. Larsson ら, 2014）。

自動運転システムを使用しているドライバは、完全手動運転に対する準備状態と周辺認知状況が低下する。周辺認知状況低下による認知の遅れ、準備状態の低下による介入の判断の遅れが影響して、ドライバの周辺状況への反応は遅れると考えられる。周辺車両との急接近のような自動運転システムが対応していない状況に直面した際のドライバの反応遅れは、追突事故を引き起こす危険性がある。そのため、特定の状況において、周辺認知状況の低下がドライバのオーバーライドに与える影響について明らかとする必要がある。

特に高速道路合流部は、周辺認知状況が低下したドライバからみて自車前方に合流車両が突然現れるかのような状況に直面し、追突が懸念されるため、課題の抽出が必須である。周辺認知状況の低下が、高速道路合流部でのオーバーライドに与える影響を明らかにし、それを基に道路側からの対策を検討する必要がある。

2.1.2.3　周辺認知状況への加齢の影響

Lisa J. Molnar ら（2017）[47]は、自動運転レベル 3 での加齢による周辺認知行動の低下を明らかにしている。ドライビングシミュレータ（DS）を用いて SAE レベル 3 の自動運転を再現した。3 つの年齢グループ(16～19 (young)、25～45 (mid)、65～75 (old) 歳)、計 72 名のドライバが実験に参加した。Lisa J. Molnar らは高速道路の運転場面において Take Over Request（以降、TOR）発生時の運転行動や視線分析を行った。young のグループは old グループに比べて視線がより広く動くこと、TOR から介入までの時間は young グループの方が old グループに比べて早いことを明らかにした。ここでいう TOR は、RTI と同義であり、自動運転がドライバに対して行う引継ぎ警告を意味する（TOR：SAE J3016 の 2014 年版、RTI：SAE J3016 の 2016 年版）。

周辺認知状況の低下を示す様々な研究は、実験参加者が 65 歳以下の非高齢ドライバ（以降、一般ドライバ）であることが多い。自動運転レベル 2 での加齢による周辺認知状況の低下を示す研究は多くない。自動運転システムは、高齢ドライバの運転負荷軽減や事故削減につながるといった報告[48]（R. J. Davidse ら, 2006）、自動ブレーキシステムによる大幅な追突事故削減の効果があるといった報告[49]（B. Fildesa ら, 2015）、高齢運転者固有の困難な状況での運転を容易にする可能性があるといった報告[50]（S. Montamedi ら, 2017）、ACC と

LKAS の使用がドライバの運転疲労度の軽減に寄与する報告（花守ら, 2021）[51] があることから、自動運転システムは、高齢ドライバの運転支援に対してメリットがあると考えられる。一方で、ドライバ運転時の高齢ドライバの運転パフォーマンスの低さ [52]（蓮花ら, 2003）、高齢ドライバの身体・認知・集中力の機能低下 [53]（鈴木, 2010）が明らかとなっており、高齢ドライバが自動運転レベル 2 を使用した際に、ドライバ運転や一般ドライバと比べてどのような周辺認知状況がどれほど低下するのか、そのような状況でオーバーライドを適切に判断可能なのかについて懸念がある。

2.1.3 自動運転システム作動下のドライバの認知行動に関するまとめ

自動運転システムへの依存や過信があるドライバは、完全手動運転への準備状態が低下し、周辺認知状況も低下する。周辺認知状況の低下は、ドライバの反応遅れに繋がる。ドライバの周辺認知状況低下は、システムへの介入に遅れを生じさせ、事故の回避に影響を与える。既往研究は、自動運転システムを使用することで周辺認知状況が低下し、新たな事故リスクの要因となることを示唆していた。

自動運転システム利用時の周辺認知状況の低下に伴う事故を回避するためには、自動運転車両とドライバが走行環境から情報を受け、HMI で連携を取ることで相互を認知し、ドライバと自動運転システムが齟齬なく操作を判断できることが重要であると考えられた。このような対応が可能となるには、周辺認知状況の低下がオーバーライドに与える影響を明らかにし、オーバーライドが発生しうるような状況での道路やシステム側によるドライバへの支援を検討する必要がある。

一方で、周辺に自車以外の車両が存在する供用中の高速道路にて、自動運転を使用中のドライバは、どのような周辺認知行動が主観的・客観的に低下しているのか、周辺認知行動の低下による影響が高速道路合流部でどのようにドライバ行動として現れるのか、その加齢の影響についての検討は多くない。加齢や主観的・客観的な周辺認知行動の低下がオーバーライドに与える影響に関する知見は、道路側による自動走行への必要な支援を明らかにする面で重要である。

2.2　追従走行下での先行車両との追突に対するドライバの危険感

2.2.1　「危険」に関する概念の整理

レベル 3 までの自動運転が追従走行する際に作動している代表的システムは、Adaptive Cruise Control (ACC)である。ACC の課題は、最大で 0.3g までの減速しか行わず、先行車両と急接近する場面のようなイレギュラーな追従状況に対応していない点である（伊藤, 2008 [35]；H. U. Ahmed ら, 2021 [36]）。イレギュラーな追従シーンで、ACC の設定（車間時間・速度）に付随した減速挙動がドライバの想定と乖離していた場合、ドライバは危険を感じて ACC に介入する。例えば、短い ACC の車間時間設定を使用して先行車両を追従中のドライバは、先行車両減速によって想定以上に接近した場合、追突への危険感から ACC の介入を判断する。ここで、ひとえに「危険」感とはといっても、危険とは広い意味を持つ。危険感を研究する際には、危険に関する概念の整理が必要である。

蓮花（2000）[54]は、交通事故発生に焦点を当て、危険に関連する主な概念をまとめている。亀井（1995）[55]、E. P. Lalley (1982) [56] や Brown & Groeger (1998) [57] らの研究を引用し、危険に関連する主な概念を、リスク(risk)、デンジャー(danger)、ペリル(peril)、ハザード(hazard)、リスク知覚または認知 (risk perception) 、ハザード知覚 (hazard perception) などに区別して紹介している。それぞれ、以下の様にまとめている。

- リスク(risk)：損害発生、事故発生の可能性
- デンジャー(danger) またはペリル(peril)：デンジャーとペリルは同一の意味。損害、事故を現実に生じさせる作用
- ハザード(hazard)：事故発生の可能性を高めるような環境条件、事象を示しており、要因は客観的危険条件
- リスク認知または知覚 (risk perception)：ハザード知覚の出力であり、リスクに関する個人の知覚・評価の過程を意味
- ハザード知覚 (hazard perception)：リスク知覚または認知まで至る事象や対象を発見する過程

イレギュラーな追従走行を例とすると、上記の概念はそれぞれ、リスクが追突事故発生の可能性、ペリル・デンジャーが先行車両の減速・前方への割り込み・停止車両の出現、ハザードが走行速度・減速度の強さ・滑り・下り上り勾配・カーブを示している。イレギュラーな追従走行時に、ドライバは、車間時間・走行速度・先行車両の減速といったハザード知覚から、先行車両との追突の可能性に対してリスクを知覚し認知する。本研究では、そのリスク認知に対するドライバの主観的評価をリスク感または危険感と呼ぶ。

2.2.2　ドライバの先行車両との追突への危険感と TTC の関係

TTC は、先行車両と追従車両の車間距離を相対速度で割った指標である（式 2-1）。同一車線上で同じ進行方向の先行車両と追従車両が追突するまでの残り時間を示している（一定相対速度で接近した場合）（K. Vogel, 2003）[58]。K.Vogel は TTC が小さいとき危険な状況

が実際に発生していることを示し、先行車両との追突リスクの指標として使用できることを示した。

$$TTC^t = \begin{cases} \dfrac{d_{rel}^t}{v_{foll}^t - v_{lead}^t} & (v_{foll}^t > v_{lead}^t) \\ \infty & (v_{foll}^t \leq v_{lead}^t) \end{cases} \quad (2\text{-}1)$$

TTC^t ：時間 t における TTC [sec]

d_{rel}^t ：時間 t における先行車両と追従車両の車間距離 [m]

v_{foll}^t ：時間 t における追従車両の速度 [m/sec]

v_{lead}^t ：時間 t における先行車両の速度 [m/sec]

ドライバは、リスクを認知し、予測することで運転行動を決定する。前節における危険の区分から見て、TTC はある時刻における追突の可能性を示す値であることから、顕在化したリスクの指標としてとらえることができる。ドライバは、TTC の値を基に自身の行動を決定していることが分かっている。たとえば、TTC は、ドライバが減速操作を判断するための指標であることが知られている。山本ら（2008）[59]は、16 名（11 名：若年、5 名：高齢）のナチュラリスティックな運転行動データの中から、TTC の値を用いて実際の運転状況における顕在的なリスクの検証を行った。その結果、TTC が 5〜10 秒の領域では接近場面遭遇回数がほぼ一定であり、TTC が 5 秒以下の領域では TTC が小さくなるほど接近場面遭遇回数は線形的に少なくなっていた。ドライバは TTC が小さくなるのを避けるため（追突リスクを避ける）、TTC が 5 秒以下ではほとんどのドライバが減速操作を行うことが確認された。過去の研究においても、TTC が 4〜5 秒に至るまでに、ほとんどのドライバは減速操作を行う（例えば、 W. V. Winsum ら (1996) [60]; B. Sultan ら (2003) [61]）。

TTC の逆数は、ドライバの視覚入力である接近する先行車両に対する視角変化率と等価であることが知られており（日本視覚学会 (2000) [62]）、先行車両の接近場面における視覚的な情報、かつ人の感覚量を示す指標として使用できることが明らかになっている。Kondoh ら（2008）[63]は、先行車両追従・接近場面の先行車両に対するドライバの主観的な危険感（以降、RF）を THW（Time Headway, 車間距離／走行車速）の逆数と TTC の逆数の線形和から定量化できることを示した（式 2-2）。第 1 項の THW の逆数は、定常追従状態でのドライバの危険感を、第 2 項の TTC の逆数は、先行車両接近場面でのドライバの危険感を示している。

$$RF\ (Risk\ Feeling) = \frac{A}{THW} + \frac{B}{TTC} \quad (2\text{-}2)$$

山本ら（2008）[59]は、式 2-2 の RF の式について、第一項は潜在的なリスク感、第二項は顕在的なリスク感として考察している。TTC については、その逆数が接近する先行車両に対する視角変化率と等価、及び、ドライバの制動開始タイミングを決定する指標であることから、第二項は顕在的なリスク感の要素と述べている。一方、THW は、先行車両が通過した場所を自車が通過するまでの時間を示しており、追従中の先行車両の不測の挙動、例えばその場で急停止する状況を想定した時は、TTC と THW の値が等しくなることから、

追従中の THW は、先行車の不測の挙動により将来発生しうる TTC の最小値と等価となり潜在的なリスク感の要素となっていると述べている。

2.2.3　冬期道路環境における自動運転

K. S. Christopher ら (2010) [64] は冬期道路環境では追突リスクが実際に高まることを明らかにしている。A. O. Hjelkrem (2016) [65] は圧雪路面で追従走行する状況では、乾燥路面や湿潤路面に比べてドライバの危険感が高まると報告している。冬期道路環境での走行時、ドライバの危険感が増大し、ドライバの自動運転への介入が増えると考えられる。ドライバの危険感は、冬期道路環境で自動運転を使用する際に課題となる。

路面凍結や視界不良が原因で、冬期道路環境での運転を困難に感じるドライバが多い。積雪寒冷地ではそのような運転条件にもかかわらず仕事及びプライベートで長距離移動を強いられる場面がある。冬期道路環境に Adaptive Cruise Control（以降、ACC）などのような追従システムが利用できれば、運転負荷の軽減、走行の安全性向上などが期待できる（J. C. de Winter ら, 2014 [49]；J. D. Lee ら, 2006 [63]；花守ら, 2021 [44]）。そのため、冬期道路環境に適応した運転支援システムに対する期待は大きい。

冬期路面での自動走行を可能とするための検討は始まったばかりである。萩原ら(2019) [66]はドライビングシミュレータ（以降、DS）を用いて ACC 使用中のドライバが前方の低 μ 路に起因するリスクを事前に回避するための情報提供について検討を試みた。前方が低 μ 路であることをドライバに伝えることで事前の減速行動をドライバが選択し、危険な事象の回避が早まることを明らかにした。

加藤ら(2019)は冬期の実道において ACC を使用した実車実験を行った [67]。オーバーライド（以降、OR (Over-Ride)）発生条件について、路面の滑り抵抗値と道路線形に着目した。道路線形・路面状態が OR 発生に影響を与えることを明らかにした。

I. Koglbauer ら（2017）は DS を用いて、雪道でのドライバの ACC 使用状況を調査した [68]。雪道における ACC の THW 設定について、短い THW (Time Headway)の設定（1[sec]）に比べ、長い THW の設定（1.8[sec]）を適切と考えるドライバが多いことを明らかにした。

冬期道路環境での自動運転の走行を可能とするためには、冬期道路環境での自動運転の適応条件を明らかにする必要がある。また、ACC は運転の自動化を実現するための重要な技術であり、冬期道路環境への ACC の適応条件を知ることは、快適・安全な自動運転を冬期道路環境に導入するための足掛かりとなる。

第 3 章　自動運転レベル 2 利用時の周辺認知行動への影響

3.1　はじめに

近年、自動運転の技術革新が進んでいる。Adaptive Cruise Control (ACC)や Lane Keeping Assistant System (LKAS)が搭載された市販車両が普及され始めている。ACC と LKAS を同時に作動させることで、システムがアクセル・ブレーキとステアリング操作を支援する SAE 自動運転レベル 2 相当の走行が可能となっている（SAE, 2016）[1]。SAE 自動運転レベル 2 において、自動運転中であってもドライバは周囲やシステムの監視タスクを分担し、全運転タスクを受け取れるように常に準備していなければならない。以降、ACC と LKAS を同時に作動させた運転を自動運転レベル 2 と表記する。実際に一般道に先駆けて高速道路（自動車専用道路）において自動運転レベル 2 の利用が広まりつつある。

自動運転レベル 2 の利用は、運転負荷軽減や一部の事故削減に対する効果が期待できる。高齢ドライバの運転負荷軽減や事故削減につながるといった報告[48]（R. J. Davidse ら, 2006）、自動ブレーキシステムによる大幅な追突事故削減の効果があるといった報告[49]（B. Fildesa ら, 2015）、高齢運転者固有の困難な状況での運転を容易にする可能性があるといった報告[50]（S. Montamedi ら, 2017）がある。ACC と LKAS の使用がドライバの運転疲労度の軽減に寄与していることも示唆されている（花守ら, 2021）[51]。

一方、自動運転レベル 2 を使用することでドライバの周辺認知行動が低下するといった報告も数多く存在している。M. Blanco ら（2015）は自動運転レベル 2 で走行しているときのドライバ特性を調査した[41]。25 名の実験参加者がテストトラックを 30[min]走行した結果、自動運転レベル 2 への過信によってドライバのイベントへの反応に対する準備状態が下がることを明らかにした。本間（2015）は自動運転レベル 2 を使用した場合、システムへの過信によりドライバの周辺認知行動が低下し、新たな事故リスクの要因となる可能性を示唆している[32]。M. R. Endsley ら（1995）はドライバが自動運転を使用した時にドライバの心理状態が能動的から受動的に変化するためにドライバの周辺認知行動が低下すると報告している[33]。加齢による周辺認知行動低下の報告もされており、Lisa J. Molnar ら（2017）はドライビングシミュレータ（DS）を用いて SAE レベル 3 の自動運転を再現し、3 つの年齢グループ(16～19、25～45、65～75 歳)のドライバを用意し、高速道路の運転場面において Take Over Request（ドライバに運転に戻ることを要求する合図：以降、TOR）発生時の運転行動や視線分析を行った[47]。一般ドライバは高齢ドライバに比べて視線がより広く動くこと、一般ドライバは TOR を一度経験すると次からは TOR 発生前に運転に移行する行動を取ることを明らかにした。de Winter ら（2014）は自動運転を利用する際のドライバの周辺認知行動についてメタ分析を行った。Winter らのメタ分析のレビュー対象となっている研究の多くは DS を用いたものであり、実走行環境での実験についてはほとんど記述されていない[28]。そのほかの研究でも自動運転の使用が周辺認知行動に与える影響に関する分析は DS を使用したものが多い（例えば、B. Christian ら, 2017[42]; L. Tyron ら, 2017

[43]; G. H. Walker ら, 2008 [44])。

周辺認知状況低下による認知の遅れ、準備状態の低下による介入の判断の遅れが影響して、ドライバの周辺状況への反応は遅れると考えられる。周辺車両との急接近のような自動運転システムが対応していない状況に直面した際のドライバの反応遅れは、追突事故を引き起こす危険性がある。周辺認知状況の低下がドライバのオーバーライドに与える影響について明らかとする必要がある。特に高速道路合流部は、周辺認知状況が低下したドライバからみて自車前方に合流車両が突然現れるかのような状況であることから、追突が懸念されるため、課題の抽出が必須である。

周辺に自車以外の車両が存在する供用中の高速道路にて、自動運転を使用中のドライバは、どのような周辺認知行動が主観的・客観的に低下しているのか、周辺認知行動の低下による影響が高速道路合流部でどのようにドライバ行動として現れるのか、その加齢の影響についての検討は多くない。加齢や主観的・客観的な周辺認知行動の低下がドライバ行動に与える影響に関する知見は、道路側による自動走行への必要な支援を明らかにする面で重要である。

そこで、本章では、合流車・分流車が多い都市内高速道路において自動運転レベル 2 と自動運転レベル 2 を使用しない運転（以降、ドライバ運転と表記）による実車走行実験を実施した。一般ドライバグループ（20代から40代）と高齢ドライバグループ（65歳以上）を実験参加者とし、自動運転レベル2における加齢の影響を分析する。周辺に自車以外の車両が存在する供用中の高速道路にて、ドライバが自動運転レベル 2 を使用中、どのような周辺認知行動が主観的・客観的に低下し、周辺認知行動の低下による影響が高速道路合流部でどのようにドライバの行動として現れるのかという点、その加齢の影響について明らかにする。その結果から、合流部で必要となる道路側による自動運転・ドライバへの支援について検討する。

3.2 実験方法

3.2.1 実験参加者

実験参加者は 15 名の一般ドライバグループと 15 名の高齢ドライバグループの計 30 名とした。両グループの主なドライバ属性を以下に記す。なお、北海道大学工学系ヒトを対象とする研究倫理審査委員会に実験内容の審査を依頼し、実験内容・安全性・倫理などについて実験実施前に承認を受けた（海大工第 254 号、2017 年 7 月 4 日）。

一般ドライバの平均年齢は 40.9 歳（std.=8.6）であった。性別は男性 13 名、女性 2 名であった。一般ドライバは週数回以上運転しており、年間走行距離は 3000km 以上であった。高速道路の運転頻度は年数回が 7 名、月数回が 6 名、週数回が 2 名であった。運転支援装置が搭載された車を運転したことがあるドライバが 6 名だった。

高齢ドライバの平均年齢は 71.5 歳（std.=3.6）であった。性別は男性 10 名、女性 5 名であった。高齢ドライバは毎日運転しており、年間走行距離は 3000km 以上であった。高速道路の運転頻度は年数回が 6 名、月数回が 8 名、ほとんどなしが 1 名であった。運転支援装置が搭載された車を運転したことがあるドライバが 1 名だった。

3.2.2 実験走行環境

本実験の走行コースを図 3-1 に示す。実験毎の交通状況がほぼ同じとなることが望ましいと考え、朝 9 時から夕方 4 時の日中に実験を実施した。実験区間の日平均交通量は約 30,000 [台/日]であり、大型車混入率は 10%である。札幌南料金所から札幌西料金所までの約 25[km]区間は都市高速道路となっている。実験区間内にはインターチェンジ(IC)が 6 か所、ジャンクション(JCT)が 1 か所、料金所が 2 か所ある。輪厚パーキングエリア(PA)から札幌南料金所までの区間の制限速度は 100[km/h]であり、札幌南料金所から手稲 IC までの制限速度は 80[km/h]である。

実験参加者は輪厚 PA から手稲 IC 間の約 34[㎞]を自動運転レベル 2 で走行した。自動運転レベル 2 の車間距離の設定は前方車両との秒数差 2.1[sec]に設定した。実験車両は自動運転レベル 2 の車間距離の設定を 3 段階から選べる(前方車両との秒数差が 1.1 秒，1.6 秒，2.1 秒)。実験の安全に配慮し、一番大きい車間距離設定の 2.1 秒を選択した。実験参加者は手稲 IC から札幌南 IC までの約 25[㎞]をドライバ運転で走行した。一回の走行で 2 人のドライバ（1 名の一般ドライバと 1 名の高齢ドライバ）が実験を行い、一日に 3 回の走行実験を行った。実験は 5 日間に渡って実施された。実験期間中は乾燥路面であり、天候も良好であった。

なお、料金所手前のドライバ行動の変化や制限速度の違いなどが分析に影響を与えないように、以降の計測や分析の対象区間を自動運転レベル 2 は札幌南料金所から手稲 IC の 27[km]、ドライバ運転は札幌西料金所から札幌南 IC の 25[km]で統一した。

3.2.3　実験車両

実験車両として自動運転レベル 2 での走行が可能な同じ 2 台の車両を用意した。1 台を高齢ドライバ、もう 1 台を一般ドライバが使用した。ドライバは自動運転レベル 2 とドライバ運転時、同じ車両を使って走行した。ドライバはハンドルに取り付けられたボタンを操作することで自動運転レベル 2 の開始や終了を行う。また、ドライバはメータクラスタ内の表示を見て自動運転レベル 2 が動作しているかどうかを確認できる。

3 人の実験スタッフが一台の実験車両に同席した。助手席に乗った実験スタッフが実験の安全管理を担当した。緊急時のために、実験スタッフが助手席からブレーキを踏めるシステムを実験車両に取り付けた。高齢ドライバの安全管理については、自動車学校の教官が担当した。残りの 2 名の実験スタッフは後方座席に座り、計測機器の管理などを行った。

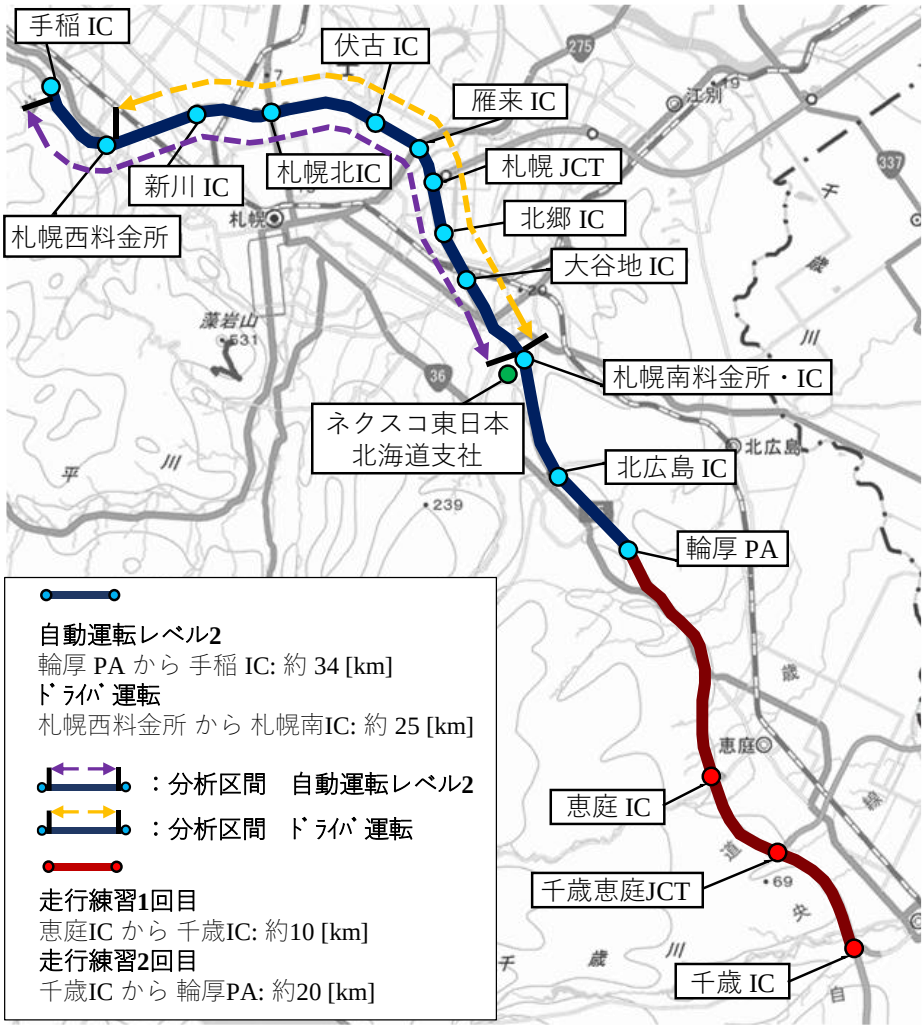


図 3-1　実験コース

3.2.4　計測

3.2.4.1　自動運転レベル 2 とドライバ運転の区間平均速度

各走行における区間平均速度を区間移動時間と計測区間の距離から算出した。自動運転レベル 2 は札幌南料金所から手稲 IC の 27[km]区間、ドライバ運転は札幌西料金所から札幌南 IC の 25[km]区間を対象とした。速度の計測は分析区間と同じとした。

3.2.4.2　実験車周辺の交通状況の記録

実験車周辺の交通状況を記録するため、実験車の前方の映像と後方の映像を実験車の車内に設置した 2 台の小型ビデオカメラ（Sony HDR-AS300、GPS による位置計測付属）で撮影した。実験走行時の交通状況について、追従車両の有無、合流車の有無、分流車の有無、合流区間における追越車線側の車両の有無を調査した。

3.2.4.3　合流部における合流車両への対応の計測

自動運転レベル 2 とドライバ運転の走行中、合流車両があったときのドライバの回避行動を計測した。自動運転レベル 2 では、合流車両があった時のドライバの回避行動として、合流部におけるオーバーライドを計測した。自動運転レベル 2 作動下では、ドライバはシステムを監督し、周辺の交通状況に注意を払わなければならない。また、ドライバは周囲の交通リスク（例；合流車両との追突リスク）に応じて、自動運転レベル 2 からドライバ運転に戻ることが求められる。自動運転レベル 2 からドライバ運転に戻る運転行動はオーバーライドと呼ばれる。ドライバによるオーバーライド発生のタイミングと理由を計測するため、車内の同乗実験担当者によるメモ、車両の Controller Area Network（以降、CAN）によるドライバのブレーキおよびウインカー操作の記録、メータクラスタに表示される自動運転レベル 2 の撮影映像を用いた。実験車周辺の交通状況を記録するため、実験車の前方の映像と後方の映像を実験車の車内に設置した 2 台の小型ビデオカメラ（Sony HDR-AS300、GPS による位置計測付属）で撮影した。合流部における合流車両への対応を自動運転レベル 2 と比較するため、ドライバ運転においても同じ方法で計測した。

3.2.4.4　ドライバの主観評価

自動運転レベル 2 の走行実験終了後、実験参加者は以下の 3 つのトピックについて主観的に評価した。ドライバ運転での走行実験後、実験参加者は“トピック 3 の運転時の周辺認知行動に関する主観評価”を回答した。走行中、ドライバが感じた周辺認知行動への意識を各周辺車両別に明らかにすることを試みた。周辺認知行動に関する主観評価は前方・側方・後方への意識を含めた質問を行った。すべての質問の回答は 7 段階尺度として、解析時に 1 から 7 点の点数を付与した。主観評価の項目を以下の表 3-1 に示す。

表 3-1　3 つのトピックに関する主観評価

トピック 1. 自動運転レベル 2 の機能に関する主観評価（全 7 項目）
(1) 自動運転レベル 2 の運転を信頼できたか 1: 信頼できなかった　←→　7: 信頼できた
(2) 車線維持の支援によって運転が楽になったか 1: 楽にならなかった　←→　7: 楽になった
(3) 進行方向の支援によって運転が楽になったか 1: 楽にならなかった　←→　7: 楽になった
(4) 自動運転レベル 2 の加速への違和感 1: 違和感あった　←→　7: 違和感なかった
(5) 自動運転レベル 2 の減速への違和感 1: 違和感あった　←→　7: 違和感なかった
(6) 自動運転レベル 2 の車間距離設定 1: 近く感じた　←→　7: 遠く感じた
(7) 自動運転レベル 2 がハンドル操作を行うことへの抵抗感 1: 抵抗を感じなかった　←→　7: 抵抗を感じた
トピック 2. 自動運転レベル 2 の作動方法や動作状態に関する主観評価（全 4 項目）
(1) 自動運転レベル 2 の作動に関する難易度 1: 難しかった　←→　7: 簡単だった
(2) 自動運転レベル 2 の作動状態の分かり易さ 1: 分かりづらかった　←→　7: 分かりやすかった
(3) 自動運転レベル 2 のキャンセル音の聞こえ易さ 1: 分かりづらかった　←→　7: 分かりやすかった
(4) 自動運転レベル 2 の動作を示すモニタの確認頻度 1: 確認しなかった　←→　7: 頻繁に確認した
トピック 3. 運転時の周辺認知行動に関する主観評価（全 9 項目）
(1) 後方への確認頻度 1: 確認しなかった　←→　7: 確認した
(2) 後方車への意識 1: 意識しなかった　←→　7: 意識した
(3) 追い越し車線への確認頻度 1: 確認しなかった　←→　7: 確認した
(4) 側方車への意識 1: 意識しなかった　←→　7: 意識した
(5) 前方車への意識 1: 意識しなかった　←→　7: 意識した
(6) 合流してくる車の確認ができたか

1: できなかった	←→	7: できた
(7) 分流していく車の確認ができたか		
1: できなかった	←→	7: できた
(8) 安全確認への意識の維持		
1: 維持できなかった	←→	7: 維持できた
(9) 周りの交通状況への意識の維持		
1: 維持できなかった	←→	7: 維持できた

3.2.4.5 ドライバの眼の映像を用いた後方認知行動の計測

ドライバモニタリングセンサー（オムロン(株)）を用いて、自動運転レベル2とドライバ運転のドライバの目線を記録した。このセンサーは、ドライバの動作と同時に目線を計測できる。しかし、太陽光などの影響、眼鏡の影響などから、すべての走行場面での計測ができなかった。このため、眼の映像を使ってフレーム毎にルームミラー及び右サイドミラーへドライバが眼を向けた行動を（以降、ミラー注視行動）計測した（図3-2)。

本研究では、合流車両があったときのドライバの回避行動に着目した。自動運転レベル2 運転時の周辺認知行動低下による問題は、合流以外に突然の割り込み車両への対応、工事区間での対応などいくつかあることが知られている。その中で、合流車両への対応が発生しやすく比較しやすいと考えた。合流部で合流車両の回避が必要となる時に、ドライバが後方車両の存在を把握できているかが重要である。自動運転レベル 2 による周辺認知低下の影響に伴って、後方を確認する動作としルームミラーと右サイドミラーへの注視行動が減ると考え、2つのミラーを対象にミラー注視行動の分析を行った。

輪厚PAにて、走行毎にドライバの注視行動のキャリブレーションを行った。また，ルームミラーと右サイドミラーを注視してもらい、そのときのミラー注視行動を映像に残した。計測方法として、ドライバの眼がルームミラー及び右サイドミラーに向かい、完全に止まった瞬間から離れた瞬間（1/30 秒間隔）までの時間を計測した。ルームミラー及び右サイドミラーに眼が連続して静止していた時間が0.2秒以上（6フレーム以上）をドライバのミラー注視行動として計測した。

ルームミラー及び右サイドミラーの注視回数と注視時間を計測した。また、ルームミラー及び右サイドミラーに眼を向けた時間の総和を全走行時間で除した値（以下、ミラー注視時間割合と定義する）をドライバごとに算出した。逆光の影響などで視線映像を取得できなかった実験参加者を除き、高齢ドライバグループ 12 名、一般ドライバグループ 15 名の自動運転レベル2とドライバ運転におけるミラー注視行動のデータを取得した。

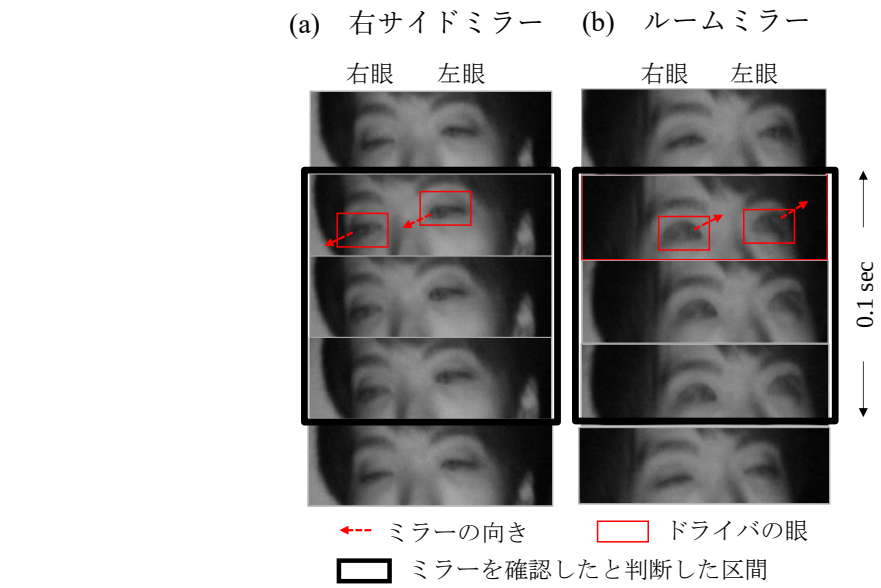


図 3-2　ドライバのミラー注視行動の計測方法

3.2.4.6　キャリブレーション

実験開始前、輪厚 PA にて、ドライバの注視行動のキャリブレーションを行った．ドライバの左右・前方への注視行動の映像、ルーム及び右サイドミラーへの注視行動の映像を記録した。

ドライバの左右・前方への注視行動の映像を記録するため、実験車両から約 10[m]離れた位置に全長約 1.8[m]の注視対象を左右中央で 5[m]おきに 3 ヵ所設置した（図 3-3(a), (b)）。ドライバが眼のみと眼と顔を動かして対象を注視する動作を映像で記録した。この時、ドライバは図 3-3(b)の①，②，③を注視する行動をした。その後、ドライバはルームミラーと右サイドミラーを目と顔を動かして確認し、その動作を映像で記録した。

図 3-3　キャリブレーションの方法

3.2.5　実験手順

3.2.5.1　実験説明

実験開始前に実験参加者に対して実験目的や内容を最初に説明した。実験手順として、自動運転レベル 2 に慣れるための練習を行ってから自動運転レベル 2 で輪厚 PA から手稲 IC

まで走行することを説明した。自動運転レベル 2 の走行後、ドライバ運転で手稲 IC から札幌南 IC まで走行することを説明した。実験参加者には、普段通りの運転を行ってくださいとだけ指示した。実験参加者に対し、自動運転レベル 2 の設定については伝えたが、それ以外の運転、合流車を回避する運転の方法などについて特別な指示はしなかった。また、ドライバ運転時にも車間距離の維持や合流車を回避する運転について特に指示しなかった。速度については、制限速度を守って走行することを伝えた。自動運転レベル 2 とドライバ運転それぞれの走行後に主観評価を実施することも伝えた。その後、運転の注意点、起こりうる危険とその対応方法、計測情報の取り扱い、練習走行の方法を説明した。最後に自動運転レベル 2 の使い方について口頭と自作による 10[min]のビデオを用いて詳しく説明した。

3.2.5.2 練習走行

実験説明後、実験参加者は自動運転レベル 2 の練習走行を行った。最初に、札幌南 IC から恵庭 IC までの約 10[km]を実験スタッフが運転し、自動運転レベル 2 を実際に使って見せる形で実験参加者に対してデモンストレーションを行った。デモンストレーションの間、実験参加者は助手席に座り自動運転レベル 2 の作動方法などを学んだ。この時、質問などにも対応した。デモンストレーション終了後、実験参加者は運転席に座り、恵庭 IC から千歳 IC までの約 10[km]を自動運転レベル 2 で走行した。自動運転レベル 2 に関する習熟をはかるために、実験参加者は自動運転レベル 2 の作動方法を何度も繰り返し練習した。最後に、実験参加者は千歳 IC から輪厚 PA までの約 20[㎞]を自動運転レベル 2 で走行し、車線変更やシステムの再設定などを繰り返し練習した。安全確保のため練習中に、合流・分流部での合流・分流車との衝突の危険性、料金所や IC 周辺でシステムを OFF にしなければならないこと、緊急時のオーバーライドの重要性についてしっかり説明した。

3.2.5.3 実験走行

練習後、実験参加者は輪厚 PA から手稲 IC までを自動運転レベル 2 で走行した。普段の運転と同じように安全運転で目的地に向かって走行することを実験担当者から指示した。実験参加者がより自動運転レベル 2 に慣れている状態で実験を行うために、自動運転レベル 2 の走行実験をドライバ運転の走行実験の前に行った。手稲 IC 到着後、実験参加者は自動運転レベル 2 の走行について主観的に評価をした。10[min]の休憩をとった後に、実験参加者は手稲 IC から札幌南 IC までをドライバ運転で走行した。ネクスコ東日本北海道支社に到着後、実験参加者はドライバ運転の走行について主観的に評価をした。

3.3　結果

3.3.1　自動運転レベル 2 とドライバ運転の走行速度

実験走行時の高齢ドライバと一般ドライバの区間平均速度について、自動運転レベル 2 とドライバ運転による走行別に算出した。それらの結果を図 3-4 に示す。一般ドライバが自動運転レベル 2 を使用した時の区間平均速度は 77.8[km/h](n=15, std.=1.4)だった。ドライバ運転では 79.8[km/h](n=15, std.=1.9)だった。高齢ドライバが自動運転レベル 2 を使用した時の区間平均速度は 78.7[km/h](n=15, std.=2.3)だった。ドライバ運転では 77.5[km/h](n=15, std.=2.0)だった。一般ドライバと高齢ドライバの両者ともに、自動運転レベル 2 とドライバ運転とで走行速度に大きな差異はなかった。

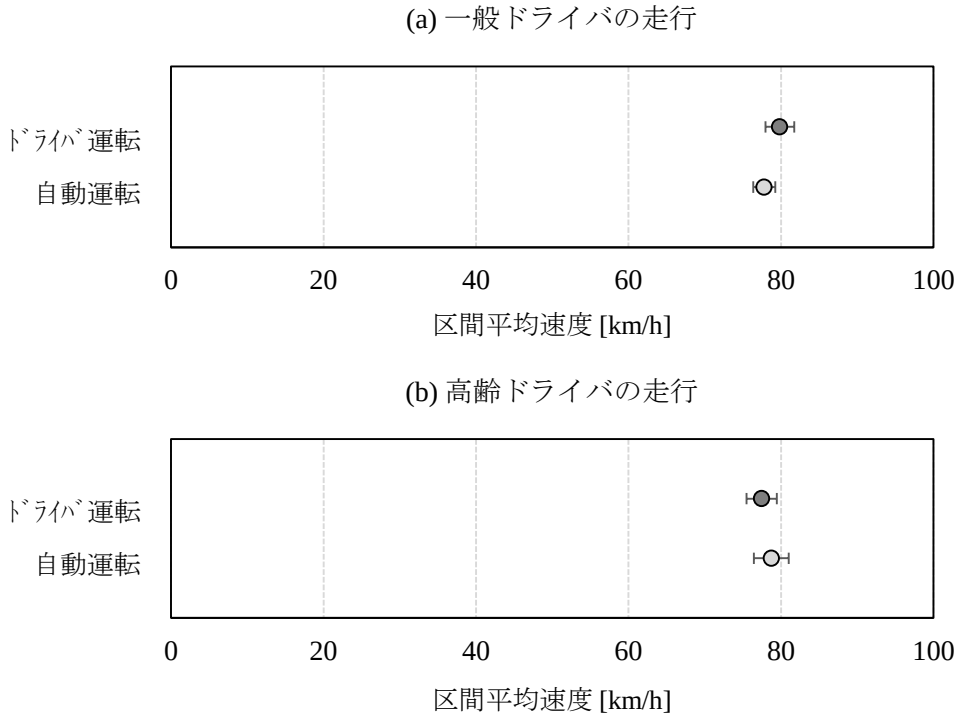


図 3-4　一般・高齢ドライバの区間平均速度（n=15）

3.3.2　合流車両の有無

実験走行時の合流車両の有無について調査した。本線左車線を走行中、自車の前方に合流車が存在した回数を図 3-5 に示す。自動運転レベル 2 とドライバ運転の走行コースの合流部の数はどちらも 5 箇所であった。往路と復路とも、各々の実験走行時に合流車が前方にあったケースはほとんどの走行で 1、2 回程度となった。合流車がなかった走行は数回、4 回以上の多数の合流車があったケースも数回のみであった。一般・高齢の各々の実験参加者において自動運転レベル 2 とドライバ運転の実験車走行時の交通状況に大きな違いはなかった。また、実験参加者間の交通状況の差異も小さかった。

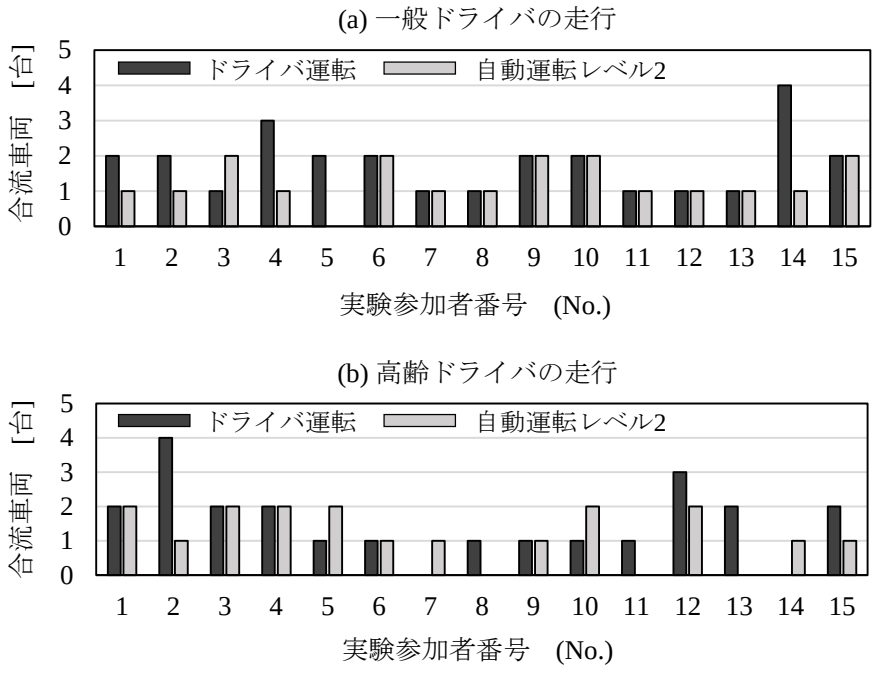


図 3-5　合流部を走行中に自車の前方に進入してきた合流車両の台数

3.3.3　合流部における合流車両への対応の結果

自動運転レベル 2 を使用中、合流部で合流車を回避するためのオーバーライドが計測された。図 3-6(a)に示すように、高齢ドライバ 15 名で計測された合流車を回避するためのオーバーライドは 7 回あった。オーバーライドを行ったのは No.1，2，3，9，12，14 の 6 名であった。オーバーライドの内容は 7 回とも減速であった。自車を減速し、合流車を先に行かせる行動をとっていた。一般ドライバ 15 名で計測された合流車を回避するためのオーバーライドは 7 回だった。そのうち、事前に追い越し車線に車線変更し合流車を回避したケースは 6 回あった。減速による回避は 1 回(No.10)であった。

一方、図 3-6(b)に示すように、ドライバ運転の高齢ドライバによる合流車への回避行動は 15 回あり、12 回が事前の車線変更による回避行動となった。ドライバ運転の一般ドライバによる合流車への回避行動は 20 回あり、19 回が事前の車線変更による回避行動となった。

高齢ドライバは自動運転レベル 2 とドライバ運転で合流車への回避行動が異なる点に特徴がみられた。高齢ドライバはドライバ運転時に合流車を事前に車線変更で回避していたのに対し、自動運転レベル 2 ではブレーキによる回避を行っていた。一般ドライバは自動運転レベル 2 とドライバ運転ともに、合流車を事前に車線変更で回避していた。

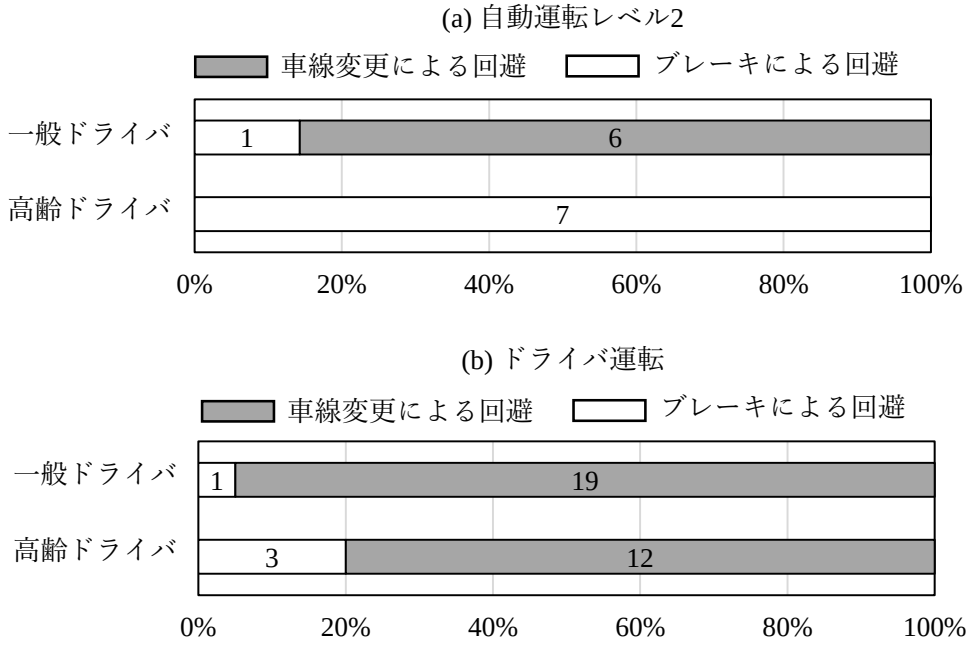


図 3-6　高齢及び一般ドライバの合流部における合流車両への対応

3.3.4　主観評価値の結果

3.3.4.1　自動運転レベル 2 の機能に関する主観評価の結果

自動運転レベル 2 の機能への信頼度に関する主観評価の平均値は一般ドライバが 5.4(Std.=1.08)、高齢ドライバが 5.4(Std.=0.94)）だった。両年齢グループに差はなく、自動運転レベル 2 をどちらかというと信頼している結果となった。極端に低い評価（信頼できなかった）もなかった。信頼できない理由としては、一般ドライバから「カーブのきついところは少し怖かった」、「工事で車線が変形していたところで動きが変だった」、「ステアリングが一部乱れることがあった」などステアリングに関する指摘があった。

ACC による運転負荷軽減度に関する主観評価の平均値は一般ドライバが 5.3 (Std.=1.10)、高齢ドライバが 5.2(Std.=0.92)だった。両者の差はなかった。自動運転レベル 2 による進行方向の支援があることで運転がどちらかというと楽になると回答する結果となった。多くの実験参加者が 4 点から 7 点と評価した。極端に低い評価とした実験参加者はいなかった。運転が楽になった理由として、一般ドライバから「10m 程度手前で前の車を感知してくれるのは安心できる」、「ブレーキを踏まなくていいことが楽(2 名)」、高齢ドライバから「慣れれば相当楽」のコメントがあった。

LKAS による運転負荷軽減度に関する主観評価の平均は一般ドライバが 5.1(Std.=1.53)、高齢ドライバが 5.2(Std.=1.23)だった。両者の差はなかった。車線維持の支援によりどちらかというと運転が楽と回答する結果となった。多くの実験参加者が 4 点から 7 点と評価した中で、一般ドライバの数名が 2 点あるいは 3 点と評価した。評価が低くなった理由として、一般ドライバから「ふらつき感があるので不安になる(2 名)」、「カーブの部分で少し不

安になった」、「結局自分で運転するのと変わらない気がする」、「工事規制などがあるので注意しなければならない」があった。また、運転が楽になった理由の中には一般ドライバから「想像以上に楽になった」、高齢ドライバから「慣れれば楽になる(2 名)」があった。

ACC による加速への違和感に関する主観評価の平均値は一般ドライバが 5.3(Std.=1.57)、高齢ドライバが 5.4(Std.=1.24)だった。一般ドライバと高齢ドライバいずれも平均 5 点強となった。両者の差はなかった。ACC の加速にどちらかというと違和感のない結果となった。2 点あるいは 3 点の低い評価（違和感を感じた）を与えた実験参加者が一般ドライバと高齢ドライバの各々に数名いた。一般ドライバから「思ったより強く加速してくれた(2 名)」、「自然だった，なめらかだった (3 名)」、高齢ドライバから「安全運転だった」、「自分の運転と同じ感じだった」などのコメントがあった。

ACC による減速への違和感に関する主観評価の平均値は一般ドライバが 5.3(Std.=1.53)、高齢ドライバが 5.4(Std.=0.97)）だった。一般ドライバと高齢ドライバいずれも平均 5 点強となった。両者の差はなかった。ACC の減速にどちらかというと違和感のない結果となった。多くの実験参加者が 4 点から 7 点と評価した中で、一般ドライバの 1 名のみ 1 点と評価した。一般ドライバから「思ったより強く加速してくれた(2 名)」、「自然だった，なめらかだった (3 名)」、高齢ドライバから「安全運転だった」、「自分の運転と同じ感じだった」などのコメントがあった。

LKAS のハンドル操作への違和感に関する主観評価値は、一般ドライバの平均が 4.6(Std.=1.36)高齢ドライバの平均が 4.7(Std.=1.53)だった（質問項目（7））。一般ドライバと高齢ドライバいずれも平均 5 点弱であった。両者の差はなかった。ハンドル操作については、他の質問項目よりも評価が少し低かった。一般ドライバから「自分で運転しているときの操作感と異なるため少し違和感がある」、「時々左右に振られる感覚があった」、「ふらつきが気になる」、「特に抵抗は感じないが、さらに滑らかになるとベスト」、高齢ドライバから「自身の運転と比較して小刻みに動くので違和感があった」、「あまり違和感なし(2 名)」のコメントがあった。

一般ドライバと高齢ドライバの両グループ共に、質問項目（1）~（5）の主観評価値の平均はそれぞれ 5.0 以上だった。質問項目（1）から（5）及び（7）において、一般ドライバと高齢ドライバの平均値間には有意な差はなかった。高齢ドライバも一般ドライバも自動運転レベル 2 に対して信頼感をもっていた（図 3-7）。ACC や LKAS による制御に対しても大きな違和感を感じることはなかったと言えた。一方、一般ドライバも高齢ドライバも自身の運転と異なる挙動があったり、システムの挙動に慣れ切っていない場合、工事区間やカーブ区間での挙動などに少し違和感を持つドライバがいた。

ACC の車間距離に関する主観評価値（質問項目（6））は、高齢ドライバの平均が 4.9、一般ドライバの平均が 4.1 であり、2 つの平均値間に有意な差 ($t=-2.46$, $df=28$, $p<0.05$)が認められた（図 3-8）。高齢ドライバは一般ドライバよりも ACC の車間距離を遠く感じていた。実験における ACC の車間距離設定は前方車両との秒数差 2.1[sec]とした。高齢ドライバか

ら「ドライバ運転のときはもっと車間距離を短くするが、ACC は安心」、「大変良い」、「適切に思う」などのコメントがあった。車間距離に対してマイナスな印象ではなかったと考えられる。

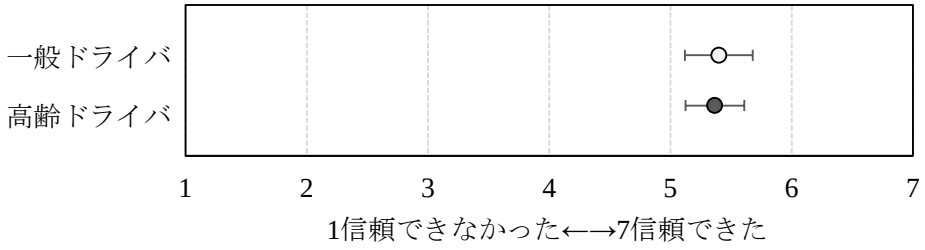


図 3-7　一般ドライバと高齢ドライバの自動運転レベル 2 に対する信頼感

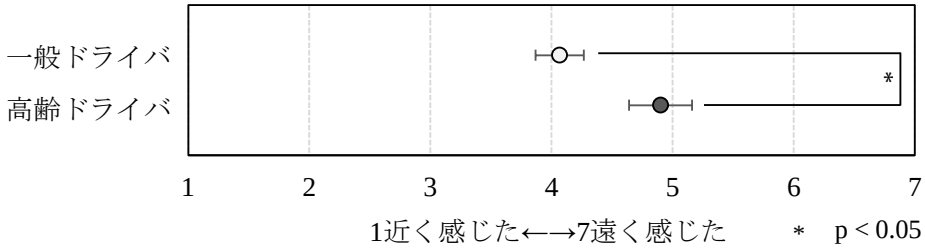


図 3-8　一般ドライバと高齢ドライバの自動運転レベル 2 の車間時間設定に関する主観評価

3.3.4.2　自動運転レベル 2 の作動方法や動作状態に関する主観評価の結果

自動運転レベル 2 の作動方法の難易度に関する主観評価値は、一般ドライバの平均が 6.1(Std.=1.09)、高齢ドライバの平均が 4.7(Std.=1.36)であり、2 つの平均値間に有意な差 (t=3.07, df=28, p<0.01)が認められた（図 3-9(a)）。高齢ドライバは一般ドライバよりも自動運転レベル 2 のセットを難しいと感じていた。「ボタンを押すとき視線がずれることが不安」といったコメントが、高齢ドライバと一般ドライバに共通してあった。

自動運転レベル 2 の作動状態のわかりやすさに関する主観評価値は、一般ドライバの平均が 6.1(Std.=1.09)、高齢ドライバの平均が 5.1(Std.=1.21)であり、2 つの平均値間に有意な差 (t=2.37, df=28, p<0.05)が認められた（図 3-9(b)）。高齢ドライバは一般ドライバに比べ自動運転レベル 2 の作動方法を難しく感じ、自動運転レベル 2 の作動状態がわかりづらいと感じていた。

高齢ドライバは一般ドライバに比べ、自動運転レベル 2 の使い方を難しく感じていることが言えた。練習走行によって自動運転レベル 2 の使用方法は理解できていたため、一度システムが OFF になっても自ら ON にできる程度には使用できていたが、使いこなすまでにはさらなる慣れが必要であると考えられる。

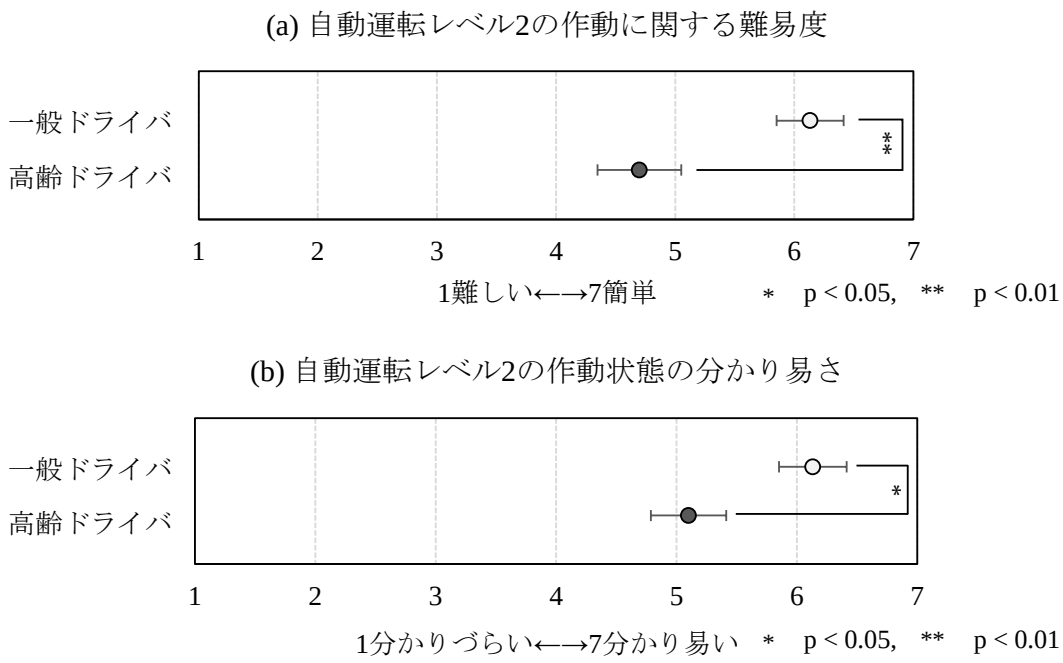


図 3-9　高齢ドライバと一般ドライバの自動運転レベル 2 の使い方に関する主観評価

3.3.4.3　周辺認知行動に関する主観評価の結果（トピック 3）

1)　自動運転レベル 2 とドライバ運転の比較

周辺認知行動に関する主観評価値について、自動運転レベル 2 とドライバ運転とで比較した。一般ドライバの結果を表 3-2、高齢ドライバの結果を表 3-3 にそれぞれ示す。

ほとんどの質問項目で、周辺認知に関する平均値は中央値の 4 より高く、5 から 6 となった。自動運転レベル 2 使用時とドライバ運転時の差がみらない項目が 9 項目中の 7 項目となった。グループ全体としては、両年齢のドライバとも自動運転レベル 2 使用時におおむね周辺認知行動への意識を維持していた。

これらの中で、自動運転レベル 2 とドライバ運転時で差が見られた結果をまとめる。運転時間とともに安全確認への意識がどうなったか、運転時間とともに周りの交通状況への意識がどうなったかにおいて、一般ドライバが自動運転レベル 2 使用時にドライバ運転時より有意に低くなる結果となった(安全確認：$t=-3.17$, $df=14$, $p<0.01$)、周りの交通状況：$t=-2.28$, $df=14$, $p<0.05$)（表 3-2）。一方、後方の確認と追い越し車線の確認で、高齢ドライバが自動運転レベル 2 使用時にドライバ運転時より有意に低くなる結果となった(後方確認：$t=-2.98$,$df=14$,$p<0.05$)、追い越し車線の確認：$t=-2.55$, $df=14$, $p<0.05$)（表 3-3）。

表 3-2　一般ドライバの周辺認知行動への主観評価値（自動運転レベル 2 vs.ドライバ運転）

質問項目	3.(1): 後方への確認頻度		3.(2): 後方車両への意識		3.(3): 追い越し車線への確認頻度	
運転状況	自動運転	ドライバ運転	自動運転	ドライバ運転	自動運転	ドライバ運転
平均値	4.93	4.93	4.80	4.87	4.87	5.07
Std.	1.39	1.44	1.51	1.41	1.59	1.24
t-value	0.00		-0.13		-0.37	
p-value	1.00		0.90		0.72	

質問項目	3.(4): 側方車両への意識		3.(5): 前方車両への意識		3.(6): 合流車両への確認意識	
運転状況	自動運転	ドライバ運転	自動運転	ドライバ運転	自動運転	ドライバ運転
平均値	4.80	5.07	5.20	5.00	6.53	6.27
Std.	1.64	1.24	1.60	1.59	0.62	1.00
t-value	-0.47		0.43		1.00	
p-value	0.65		0.68		0.33	

質問項目	3.(7): 分流車両への確認意識		3.(8): 安全確認への意識の維持		3.(9): 交通状況への意識の維持	
運転状況	自動運転	ドライバ運転	自動運転	ドライバ運転	自動運転	ドライバ運転
平均値	6.00	6.07	4.53	6.27	5.07	6.27
Std.	1.71	1.06	1.82	0.93	1.61	0.93
t-value	-0.18		-3.17		-2.28	
p-value	0.86		0.007		0.04	

表 3-3　高齢ドライバの周辺認知行動への主観評価値（自動運転レベル 2 vs.ドライバ運転）

質問項目	3.(1): 後方への確認頻度		3.(2): 後方車両への意識		3.(3): 追い越し車線への確認頻度	
運転状況	自動運転	ドライバ運転	自動運転	ドライバ運転	自動運転	ドライバ運転
平均値	4.83	5.70	5.10	5.50	5.17	5.77
Std.	0.85	0.89	0.79	1.02	0.72	0.87
t-value	-2.98		-1.10		-2.55	
p-value	0.01		0.29		0.02	

質問項目	3.(4): 側方車両への意識		3.(5): 前方車両への意識		3.(6): 合流車両への確認意識	
運転状況	自動運転	ドライバ運転	自動運転	ドライバ運転	自動運転	ドライバ運転
平均値	4.83	5.30	5.10	5.03	5.70	6.10
Std.	0.89	0.96	1.07	0.87	1.00	0.69
t-value	-1.70		0.21		-1.70	
p-value	0.11		0.84		0.11	

質問項目	3.(7): 分流車両への確認意識		3.(8): 安全確認への意識の維持		3.(9): 交通状況への意識の維持	
運転状況	自動運転	ドライバ運転	自動運転	ドライバ運転	自動運転	ドライバ運転
平均値	5.63	6.03	5.77	6.03	5.90	5.90
Std.	1.10	0.78	1.17	0.83	1.07	0.82
t-value	-2.10		-1.17		0.00	
p-value	0.05		0.26		1.00	

表 3-4　自動運転レベル 2 の周辺認知行動に関する主観評価値　高齢 vs.一般

質問項目	3.(1): 後方への確認頻度		3.(2): 後方車両への意識		3.(3): 追い越し車線への確認頻度	
ドライバ	高齢	一般	高齢	一般	高齢	一般
平均値	4.83	4.93	5.10	4.80	5.17	4.87
Std.	0.85	1.39	0.78	1.51	0.72	1.59
t-value	0.23		-0.66		-0.64	
p-value	0.82		0.52		0.53	

質問項目	3.(4): 側方車両への意識		3.(5): 前方車両への意識		3.(6): 合流車両への確認意識	
運転状況	高齢	一般	高齢	一般	高齢	一般
平均値	4.83	4.80	5.10	5.20	5.70	6.53
Std.	0.89	1.64	1.07	1.60	1.00	0.62
t-value	-0.07		0.19		2.66	
p-value	0.95		0.85		0.01	

質問項目	3.(7): 分流車両への確認意識		3.(8): 安全確認への意識の維持		3.(9): 交通状況への意識の維持	
運転状況	高齢	一般	高齢	一般	高齢	一般
平均値	5.63	6.00	5.77	4.53	5.90	5.07
Std.	1.10	1.71	1.17	1.82	1.07	1.61
t-value	0.67		-2.13		-1.61	
p-value	0.51		0.04		0.12	

表 3-5　ドライバ運転の周辺認知行動に関する主観評価値　高齢 vs.一般

質問項目	3.(1): 後方への確認頻度		3.(2): 後方車両への意識		3.(3): 追い越し車線への確認頻度	
ドライバ	高齢	一般	高齢	一般	高齢	一般
平均値	4.90	5.70	4.90	5.50	5.10	5.80
Std.	1.44	0.89	1.41	1.02	1.24	0.87
t-value	-1.70		-1.36		-1.73	
p-value	0.10		0.18		0.09	

質問項目	3.(4): 側方車両への意識		3.(5): 前方車両への意識		3.(6): 合流車両への確認意識	
運転状況	高齢	一般	高齢	一般	高齢	一般
平均値	5.10	5.30	5.00	5.00	6.30	6.10
Std.	1.24	0.96	1.59	0.87	1.00	0.69
t-value	-0.56		1.11		0.51	
p-value	0.58		0.28		0.61	

質問項目	3.(7): 分流車両への確認意識		3.(8): 安全確認への意識の維持		3.(9): 交通状況への意識の維持	
運転状況	高齢	一般	高齢	一般	高齢	一般
平均値	6.10	6.00	6.30	6.00	6.30	5.90
Std.	1.06	0.78	0.93	0.83	0.93	0.82
t-value	0.09		0.70		1.11	
p-value	0.93		0.49		0.28	

2) 一般ドライバと高齢ドライバの比較

自動運転レベル 2 の周辺認知行動に関する主観評価値について、高齢ドライバと一般ドライバとで比較した（表 3-4)。合流車両への確認に関する主観評価値（質問項目（6））は高齢ドライバの平均値が 5.70(Std.=1.00)、一般ドライバの平均値が 6.53(Std.=0.62)であり、2 つの平均値間に有意な差が認められた(t=2.66, df=28, p<0.05)。安全確認への意識の維持に関する主観評価値（質問項目（8））は高齢ドライバの平均値が 5.77(Std.=1.17)、一般ドライバの平均値が 4.53(Std.=1.82)であり、2 つの平均値間に有意な差が認められた(t=-2.13, df=28, p<0.05)。

ドライバ運転の周辺認知行動に関する主観評価値について、高齢ドライバと一般ドライバとで比較した（表 3-5)。 合流車両への確認に関する主観評価値（質問項目（6））は高齢ドライバの平均値が 6.30(Std.=1.00)、一般ドライバの平均値が 6.10(Std.=0.69)であった。安全確認への意識の維持に関する主観評価値（質問項目（8））は高齢ドライバの平均値が 6.30(Std.=0.93)、一般ドライバの平均値が 6.00(Std.=0.83)であった。ドライバ運転の主観評価値の比較については高齢ドライバと一般ドライバとで有意な差が認められた項目はなかった。

3) 自動運転レベル 2 の周辺認知行動に関する主観評価の個人別分析

自動運転レベル 2 の周辺認知行動に関する主観評価値について個人別のレーダーチャートを図 3-10 に示した。図 3-10 では、自動運転レベル 2 の主観評価値がドライバ運転と比べて低下したものを青点、増加したものを赤点、同値であったものを黒点として表現した。図 3-10(a)は一般ドライバ 15 名、図 3-10(b)は高齢ドライバ 15 名のレーダーチャートを表している。青点の数が赤点よりも多かったドライバを青枠で、赤点の数が青点よりも多かったドライバを赤枠で囲った。

図 3-10(a)において、青点の数が赤点の数よりも多かった一般ドライバは 15 名中 7 名(青点が多い順から No.7, 9, 12, 5, 14, 8, 11)だった。赤点と青点が同数だったドライバは 15 名中 4 名だった。赤点の数が青点の数よりも多かったドライバは 15 名中 4 名だった。一般ドライバ全体の特徴として、主観評価値の低下が多くなったドライバは 15 名中 7 名であり、全体の半数以下であった。青枠内の No.7, 9, 12, 5 のドライバは後方、側方の確認頻度や意識、周辺の交通状況や安全確認の意識の維持が低下していた。No.1 のドライバは後方の頻度や意識、合流車両への意識が増加した一方で、安全確認と周辺の交通状況への意識の維持、追い越し車線の確認頻度が低下していた。赤枠内の No.2, 10, 4 のドライバは自動運転レベル 2 を使用することで合流車両と前方への意識が増加していた。No.13 の最も年齢の若い(23 歳)ドライバは全体について満点を示した。

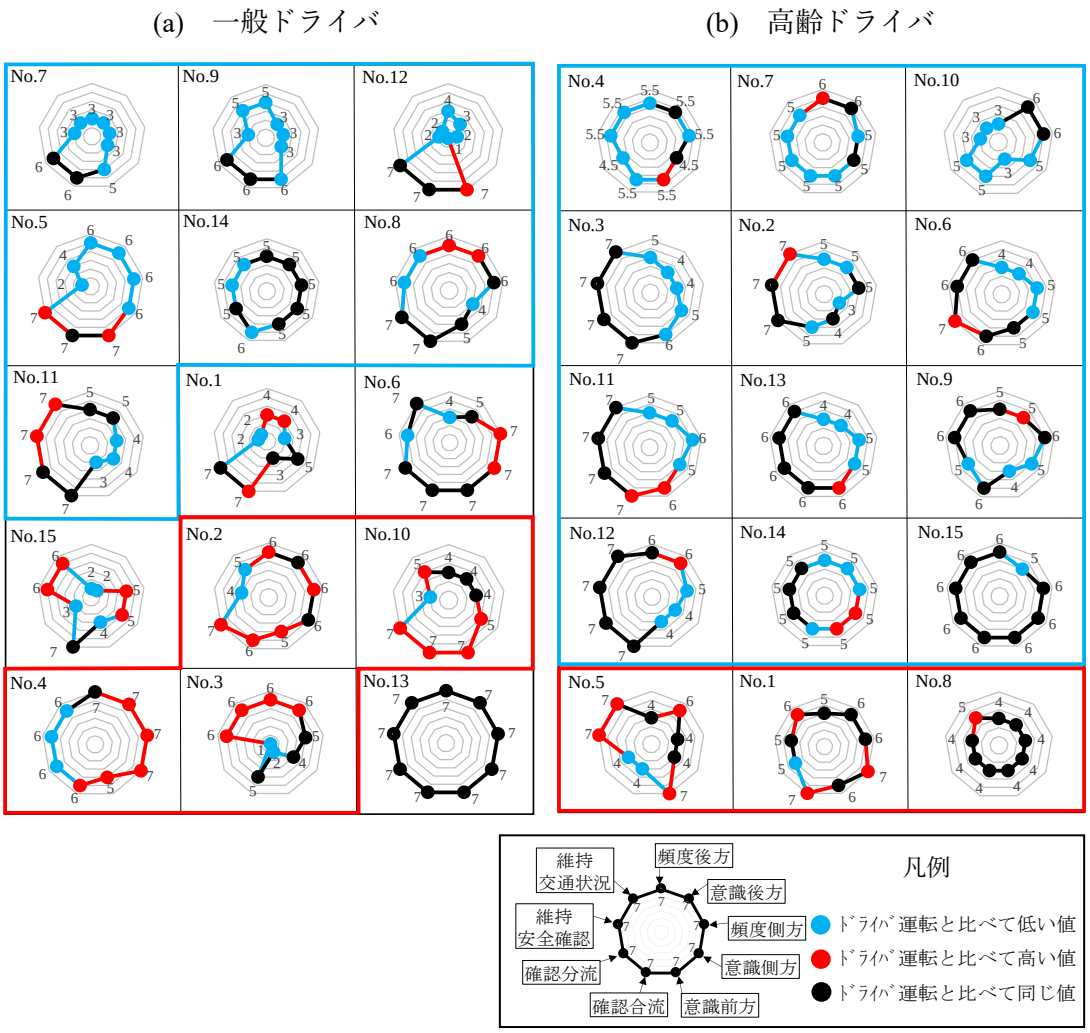


図 3-10　自動運転レベル 2 の周辺認知行動に関する個人別主観評価値

図 3-10(b)において、青点の数が赤点の数よりも多かった高齢ドライバは 15 名中 12 名(No.4, 7, 10, 3, 2, 6, 11, 13, 9, 12, 14, 15)だった。赤点の数が青点の数よりも多かったドライバは 15 名中 3 名だった。高齢ドライバの全体の特徴として、主観評価値の低下が多くなったドライバがほとんどであった。青枠内の No.4, 7, 10 のドライバは安全確認と周辺の交通状況への意識の維持に関する主観評価値と分流・合流部への意識が低下していた。一方で、そのほかの 12 名は安全確認と周辺の交通状況への意識の維持に関する主観評価値について、自動運転レベル 2 とドライバ運転で低下は見られなかった。安全確認への意識の維持に関する主観評価値については、No.2, 5, 1, 8 の 4 名が増加していた。No.3, 6, 11, 13 の高齢ドライバは後方、側方の確認頻度や意識が低下していた。

3.3.4.4　主観評価に関するまとめ

ドライバは自動運転レベル 2 の機能や作動方法・作動状態、周辺認知行動への意識を走行後に主観的に評価した。周辺認知行動に関する主観評価は前方・側方・後方への意識を含めた質問を行うことで、走行中にドライバが感じた周辺認知行動への意識について各周辺車両別に明らかにすることを試みた。トピック別での結果を以下にまとめる。

1) 自動運転レベル 2 の機能に関する主観評価の結果から、一般ドライバと高齢ドライバの両グループ共に、自動運転レベル 2 によって運転が楽になり、自動運転レベル 2 を信頼して使用できていた。一方、工事区間やカーブ区間でのステアリング操作（LKAS）が自身の運転と異なるものであった場合、またはLKASの挙動に慣れ切っていない場合に LKAS に対して多少の違和感を持っていた。
2) 自動運転レベル 2 の作動方法の難易度に関する主観評価値では、高齢ドライバは一般ドライバに比べ自動運転レベル 2 の作動方法を難しく感じ、自動運転レベル 2 の作動状態がわかりづらいと感じていた。高齢ドライバは一般ドライバに比べ、自動運転レベル 2 の使い方を難しく感じていた。
3) 周辺認知行動に関する主観評価値について、自動運転レベル 2 とドライバ運転とで比較した。一般ドライバは、運転が楽になったことで安全への意識の維持が難しくなったことに懸念を示していた。高齢ドライバは自動運転レベル 2 を使用することで後方や追い越し車線の確認ができなくなったと評価していた。
4) 自動運転レベル 2 の周辺認知行動に関する主観評価値について、高齢ドライバと一般ドライバとで比較した。高齢ドライバは、一般ドライバに比べて合流車両への確認の主観評価値が低くなっていた。高齢ドライバの安全確認への意識の維持に関する主観評価は一般ドライバに比べて高くなっていた。ドライバ運転の周辺認知行動に関する主観評価値は、高齢ドライバと一般ドライバとで差異のある項目はなかった。
5) 自動運転レベル 2 の周辺認知行動に関する主観評価値について個人別に分析した。一般ドライバ全体の特徴として、主観評価値の低下が多くなったドライバは 15 名中 7 名であり、全体の半数以下であった。最も年齢の若い(23 歳)ドライバは周辺認知行動に関する主観評価値の全体について満点を示していた。高齢ドライバ全体の特徴として、主観評価値の低下が多くなったドライバは 15 名中 12 名であり、半数以上だった。

鈴木（2010）[53]蓮花ら（2003）[52]は、高齢ドライバは安全運転への自己評価は高い一方で実際の運転行動とは合致しない点がある、意識と行動のミスマッチといった高齢ドライバの問題点を挙げている。合流部での意識が一般ドライバよりも落ちている点、オーバーライドがブレーキによるものであったことから、4)における高齢ドライバの安全確認への意識の維持が一般ドライバより高かったのは、高齢ドライバの自己評価の高さから現れた結果であると考えられる。

3.3.5　ミラー注視行動の結果

3.3.5.1　自動運転レベル 2 とドライバ運転の比較

1)　右サイド及びルームミラーの注視頻度

右サイド及びルームミラー各々への総注視回数を走行時間で除することで、1 分間にミラーを注視した回数を求めた（以降、ミラー注視頻度)。高齢ドライバと一般ドライバによる右サイド及びルームミラーの各々の注視頻度の平均値、標準偏差を表 3-6 に示す。運転条件となる自動運転レベル 2 とドライバ運転で比較した。

高齢ドライバの右サイドミラーの平均注視頻度は自動運転レベル 2 のとき 2.83 [gazes/min]（Std. = 1.44)、ドライバ運転のとき 3.29 [gazes/min] （Std. = 1.89）となった。一般ドライバの右サイドミラーの平均注視頻度は自動運転レベル 2 のとき 2.90 [gazes/min]（Std. = 1.87)、ドライバ運転のとき 2.85 [gazes/min]（Std. = 1.45）となった。高齢ドライバと一般ドライバ共に、自動運転レベル 2 とドライバ運転で右サイドミラーの平均注視頻度に有意な差は見られなかった。

高齢ドライバのルームミラーの平均注視頻度は自動運転レベル 2 のとき 0.76[gazes/min]（Std. = 0.79)、ドライバ運転のとき 1.13[gazes/min]（Std. = 1.03）となった。高齢ドライバにおいて、自動運転レベル 2 とドライバ運転でルームミラーの平均注視頻度に有意な傾向(t=-2.13, df=11, p<0.1)が見られた。一般ドライバのルームミラーの平均注視頻度は自動運転レベル 2 のとき 1.65[gazes/min]（Std. = 1.32)、ドライバ運転のとき 2.32[gazes/min]（Std. = 1.71）となった。一般ドライバにおいて、自動運転レベル 2 とドライバ運転でルームミラーの平均注視頻度に有意な差が見られた(t=-2.28, df=14, p<0.05)。

自動運転レベル 2 とドライバ運転の比較で、高齢・一般ドライバとも右サイドミラーのとき、運転条件の差はなく、ほぼ同じ注視頻度となった。高齢・一般ドライバとも、自動運転レベル 2 でのルームミラーの注視頻度はドライバ運転より少なくなった。実験時、追い越し車線に車両が常時存在しており、基本的に自車よりも早い速度で走行している（視界に入っている)。そのため、追い越し車線の車両の確認、割り込み、などへの意識として右サイドミラーの注視頻度は変わらなかったと考えられる。一方、自動運転レベル 2 では自車のアクセル・ブレーキはシステムが制御しており、後方車両との速度差を意識してアクセル・ブレーキ操作をすることがなくなったため、ルームミラーの注視頻度が減ったと考えられる。高齢ドライバは主観的には、後方・追い越し車線への確認頻度が低下していたと回答しており、ミラーで実際に見ていたとしても意識が向いていたとは限らない結果となった。

表 3-6　自動運転レベル 2 とドライバ運転中の右サイドミラーとルームミラーの注視頻度

注視ミラー	右サイドミラー				ルームミラー			
ドライバグループ	高齢ドライバ		一般ドライバ		高齢ドライバ		一般ドライバ	
運転タイプ	自動	ドライバ	自動	ドライバ	自動	ドライバ	自動	ドライバ
データ数	12	12	15	15	12	12	15	15
平均注視頻度 [gazes/min]	2.83	3.29	2.90	2.85	0.76	1.13	1.65	2.32
Std.	1.44	1.89	1.87	1.45	0.79	1.03	1.32	1.71
t-value	−1.38		0.15		−2.13		−2.28	
p-value	0.19		0.88		0.06		0.04	

2)　右サイド及びルームミラーの注視時間

高齢ドライバと一般ドライバによる右サイドミラーとルームミラーの各々の注視時間の平均値、標準偏差を表 3-7 に示す。運転条件となる自動運転レベル 2 とドライバ運転で比較した。

高齢ドライバの右サイドミラーの平均注視時間は、自動運転レベル 2 のとき 0.51[sec]（Std. = 0.06）、ドライバ運転のとき 0.37[sec]（Std. = 0.07）となり、自動運転レベル 2 のとき有意に長い注視時間となった(t=7.81, df=14, p<0.01)。また、一般ドライバの右サイドミラーの平均注視時間は、自動運転レベル 2 のとき 0.69[sec]（Std. = 0.20）、ドライバ運転のとき 0.49[sec]（Std. = 0.12）となり、自動運転レベル 2 のとき有意に長い注視時間となった(t=4.52, df=14, p<0.01)。

高齢ドライバのルームミラーの平均注視時間は、自動運転レベル 2 のとき 0.48[sec]（Std. = 0.26）、ドライバ運転のとき 0.49[sec]（Std. = 0.12）となった。一般ドライバのルームミラーの平均注視時間は、自動運転レベル 2 のとき 0.70[sec]（Std. = 0.25）ドライバ運転のとき 0.50[sec]（Std. = 0.18）となった。一般ドライバにおいて自動運転レベル 2 のときルームミラーの注視時間が有意に長くなった(t=-2.94, df=14, p<0.05)。

高齢・一般ドライバとも、右サイドミラーの注視時間は自動運転レベル 2 を使用した時にドライバ運転よりも長くなった。また、ルームミラーについても一般ドライバは同様の傾向となった。高齢ドライバのルームミラー注視時間は自動運転レベル 2 とドライバ運転で差異がなかった。高齢ドライバのルームミラーを除いて、自動運転レベル 2 での注視時間はドライバ運転のそれより長くなる傾向となった。

自動運転レベル 2 では、アクセル・ブレーキ・ハンドル操作をシステムが行っているため、ミラーを長く見る余裕がドライバ運転に比べてあった。そのため、ミラーの注視時間が自動運転レベル 2 の方が長くなったと考えられる。主観的な周辺認知への意識が低下しているドライバは、長くミラーを確認していたからと言って、必ずしも周辺認知行動が高まったわけではないことに留意が必要である。

表 3-7　自動運転レベル 2 とドライバ運転中の右サイドミラーとルームミラーの注視時間

注視ミラー	右サイドミラー				ルームミラー			
ドライバグループ	高齢ドライバ		一般ドライバ		高齢ドライバ		一般ドライバ	
運転タイプ	自動	ドライバ	自動	ドライバ	自動	ドライバ	自動	ドライバ
データ数	12	12	15	15	12	12	15	15
平均注視時間 [sec]	0.51	0.37	0.69	0.49	0.48	0.54	0.70	0.50
Std.	0.06	0.07	0.20	0.12	0.26	0.14	0.25	0.18
t-value	7.81		4.52		-0.55		2.94	
p-value	0.00		0.00		0.59		0.01	

3.3.5.2　一般ドライバと高齢ドライバの比較

1)　右サイド及びルームミラーの注視頻度

自動運転レベル 2 とドライバ運転における高齢ドライバと一般ドライバの注視頻度を比較した結果を表 3-8 に示す。それぞれの平均注視頻度について対応のない t 検定を行った。

自動運転レベル 2 のとき、一般ドライバの右サイドミラーの平均注視頻度は 2.90[gazes/min]（Std. = 1.87)、高齢ドライバは 2.83[gazes/min]（Std. = 1.44）となった。また、ドライバ運転のとき、一般ドライバの右サイドミラーの平均注視頻度は 2.85[gazes/min]（Std. = 1.45)、高齢ドライバは 3.29[gazes/min]（Std. = 1.89）となった。自動運転レベル 2 とドライバ運転ともに、一般ドライバと高齢ドライバを比較した結果、右サイドミラーへの平均注視頻度には有意な差は見られなかった。

自動運転レベル 2 のとき、一般ドライバのルームミラーの平均注視頻度は 1.65[gazes/min]（Std. = 1.32)、高齢ドライバは 0.76[gazes/min]（Std. = 0.79）となった。自動運転レベル 2 を使用した際、一般ドライバと高齢ドライバのルームミラーの平均注視頻度の差に有意傾向があった (t=1.98, df=26, p<0.1)。また、ドライバ運転のとき、一般ドライバのルームミラーの平均注視頻度は 2.32[gazes/min] （Std. = 1.71)、高齢ドライバは 1.13[gazes/min]（Std. = 1.03）となった。自動運転レベル 2 のケースと同様にドライバ運転の際、一般ドライバと高齢ドライバのルームミラーの平均注視頻度の差に有意傾向があった(t=2.05, df=26, p<0.1)。

注視対象が右サイドミラーのとき、自動運転レベル 2 とドライバ運転で注視頻度について高齢ドライバと一般ドライバの差はなかった。一方、注視対象がルームミラーのとき、自動運転レベル 2 とドライバ運転の両者において、高齢ドライバは一般ドライバより注視頻度が少なくなった。高齢ドライバも一般ドライバも追い越し車線にいる車両の存在の確認は同様となっていた。常時側方を車両が通過することで、視界に入るため、無意識であっても右サイドミラーへ目線が向いたことから変化はなかったものとみられる。一方、アクセル・ブレーキ操作をすることがなくなったことで、高齢ドライバはより後方車両との速度差を意識することがなくなり、ルームミラーの注視頻度の減少が起こったと考えられ

る。これは、高齢ドライバが自動運転レベル 2 の制御を頼っていたためと考えられる。

表 3-8　右サイド及びルームミラーの注視頻度に関する一般ドライバと高齢ドライバの比較

注視ミラー	右サイドミラー				ルームミラー			
運転タイプ	自動運転レベル 2		ドライバ運転		自動運転レベル 2		ドライバ運転	
ドライバグループ	一般	高齢	一般	高齢	一般	高齢	一般	高齢
データ数	15	12	15	12	15	12	15	12
平均注視頻度 [gazes/min]	2.90	2.83	2.85	3.29	1.65	0.76	2.32	1.13
Std.	1.87	1.44	1.45	1.89	1.32	0.79	1.71	1.03
t-value	0.10		–0.67		1.98		2.05	
p-value	0.92		0.51		0.06		0.05	

2)　右サイド及びルームミラーの注視時間

自動運転レベル 2 とドライバ運転における高齢ドライバと一般ドライバのミラーの平均注視時間を比較した結果を表 3-9 に示す。それぞれの平均注視時間について対応のない t 検定を行った。

自動運転レベル 2 のとき、一般ドライバの右サイドミラーへの平均注視時間は 0.69[sec]（Std. = 0.20）、高齢ドライバは 0.51[sec]（Std. = 0.06）であった。自動運転レベル 2 での一般ドライバと高齢ドライバの右サイドミラーへの平均注視時間の差は有意となった(t=3.16, df=26, p<0.01)。ドライバ運転のとき、一般ドライバの右サイドミラーの平均注視時間は 0.49[sec]（Std. = 0.12）、高齢ドライバは 0.37[sec]（Std. = 0.07）であった。ドライバ運転での一般ドライバと高齢ドライバの右サイドミラーへの平均注視時間の差は有意となった (t=2.93, df=26, p<0.01)。

自動運転レベル 2 のとき、一般ドライバのルームミラーの平均注視時間は 0.70[sec]（Std. = 0.25）、高齢ドライバは 0.48[sec]（Std. = 0.26）であった。自動運転レベル 2 での一般ドライバと高齢ドライバのルームミラーへの平均注視時間の差は有意となった(t=2.09, df=25, p<0.05)。ドライバ運転のとき、一般ドライバのルームミラーの平均注視時間は 0.50[sec]（Std. = 0.18）、高齢ドライバは 0.54[sec]（Std. = 0.14）となった。ドライバ運転のとき、ルームミラーの平均注視時間に有意な差は見られなかった。

高齢ドライバの右サイドミラーへの注視時間は自動運転レベル 2 とドライバ運転の両者において一般ドライバより短くなった。また、自動運転レベル 2 使用時の高齢ドライバのルームミラーへの注視時間は一般ドライバより短くなった。ドライバ運転では同程度の注視時間であった。高齢ドライバのルームミラー注視時間についても、頻度と同様に、アクセル・ブレーキ操作をすることがなくなったことによる後方車両への意識の低下が考えられる。高齢ドライバの周辺認知に関する先行研究では、高齢ドライバは自動運転レベル 2

への過信・依存によって、周辺認知行動に対する低下の影響が一般ドライバよりも大きいという報告がある（例えば、C. Schwarz ら, 2019 [69]; Ho, G. Kiff ら, 2005 [70]）。高齢ドライバの方が一般ドライバに比べて、速度制御をしなくなくことでシステムに頼った運転状態となり、ルームミラーの注視時間、頻度が低下していたと考えられる。

表3-9　右サイド及びルームミラーの注視時間に関する一般ドライバと高齢ドライバの比較

注視ミラー	右サイドミラー				ルームミラー			
運転タイプ	自動運転レベル 2		ドライバ運転		自動運転レベル 2		ドライバ運転	
ドライバグループ	一般	高齢	一般	高齢	一般	高齢	一般	高齢
データ数	15	12	15	12	15	12	15	12
平均注視時間 [sec]	0.69	0.51	0.49	0.37	0.70	0.48	0.50	0.54
Std.	0.20	0.06	0.12	0.07	0.25	0.26	0.18	0.14
t-value	3.16		2.93		2.09		–0.58	
p-value	0.006		0.007		0.047		0.56	

3.3.5.3　ミラー注視時間割合に関する個人別分析

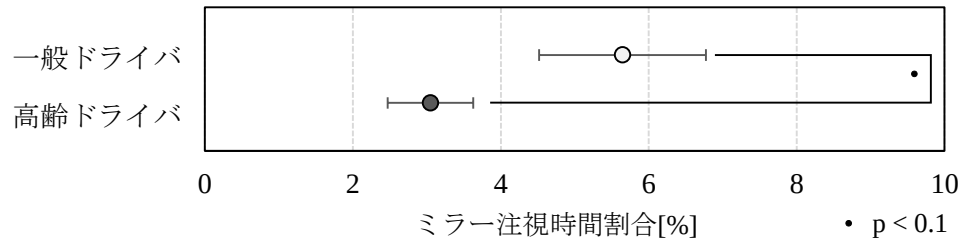
1)　計測結果

右サイドミラーとルームミラーへの注視時間の総和を全走行時間で除することによってドライバが周辺認知行動に費やした時間を求め、自動運転レベル 2 とドライバ運転を比較した。逆光の影響などで眼の映像を取得できなかった実験参加者を除き、高齢ドライバ 12 名、一般ドライバ 15 名の自動運転レベル 2 とドライバ運転のミラー注視時間割合のデータを取得した。制限速度・走行時間の長さや料金所でのミラー注視時間割合への影響を防ぐため、計測区間を自動運転レベル 2 は札幌南料金所から手稲 IC、ドライバ運転は札幌西料金所から札幌南 IC までとした。

自動運転レベル 2 とドライバ運転の平均ミラー注視時間割合を高齢ドライバと一般ドライバで比較した結果が図 3-11 である。自動運転レベル 2 を使用したときの一般ドライバの平均ミラー注視時間割合は 5.6[%](Std=4.4%)、高齢ドライバは 3.0[%](Std.=2.0%)であり、この 2 つの平均値間に有意差の傾向があった(t=-2.05, df=25, p=0.05)。自動運転レベル 2 を使用した時の高齢ドライバのミラー注視時間割合は一般ドライバに比べて有意に低い傾向がみられた(図 3-11(a))。

ドライバ運転のときの一般ドライバの平均ミラー注視時間割合は 4.6[%](Std.=2.5%)、高齢ドライバは 3.5[%](Std.=2.2%)であり、この 2 つの平均値間に有意な差はなかった(図 3-11(b))。また、一般ドライバと高齢ドライバ共に、自動運転レベル 2 とドライバ運転の比較においては有意な差は見られなかった（一般：t=-1.42, df=25, p=0.18、高齢：t=0.47, df=23, p=0.65）。

(a)　自動運転レベル2



(b)　ドライバ運転

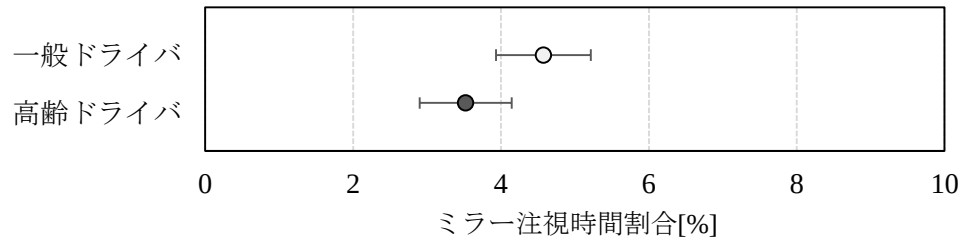


図 3-11　自動運転レベル高齢ドライバと一般ドライバの平均ミラー注視時間割合

2)　ミラー注視時間割合の個人別分析

一般ドライバと高齢ドライバのミラー注視時間割合について個人別に図 3-12 に示した。図 3-12 では、自動運転レベル 2 のミラー注視時間割合がドライバ運転と比べて低下したものを青線、増加したものを赤線として表現した。左上の No.は実験参加者番号を示しており、図 3-12 と同じ順番で並べた。

図 3-12 において、自動運転レベル 2 を使用した時にミラー注視時間割合が低下した一般ドライバは 15 名中 6 名だった。自動運転レベル 2 を使用した時にミラー注視時間が低下した一般ドライバのうち No.7, 9, 12 の 3 名のドライバは周辺認知行動に関する主観評価値が低下していた。一方で、ミラー注視時間割合が増加したドライバは 15 名中 9 名だった。自動運転レベル 2 を使用した時にミラー注視時間が増加した一般ドライバのうち No.4, 3, 13 の 3 名のドライバは周辺認知行動に関する主観評価値が増加していた。No.13 の最も年齢の若いドライバは主観評価値に満点をつけ、ミラー注視時間割合が増加していた。

図 3-12 において、自動運転レベル 2 を使用した時にミラー注視時間割合が低下した高齢ドライバは 12 名中 9 名だった。自動運転レベル 2 を使用した時にミラー注視時間が低下した高齢ドライバのうち No.4, 7, 10, 3, 2, 6, 11, 12, 14, 15 の 9 名のドライバは周辺認知行動に関する主観評価値が低下していた。No.4, 10, 3, 2, 6, 11, 14,のドライバは後方の確認頻度と意識の主観評価項目が両方とも低下していた。後方の頻度や意識への主観評価値が低下していた高齢ドライバの多くがミラー注視時間割合も低下していた。No.4, 3, 11 の高齢ドライバは自動運転レベル 2 を使用した時にミラー注視時間割合が半減した。一方で、ミラー注視時間割合が増加した高齢ドライバは 12 名中 3 名だった。自動運転レベル 2 を使用した時にミラー注視時間が増加した高齢ドライバのうち No.8 の高齢ドライバは周辺認知行動に関する主観評価値が増加していた。

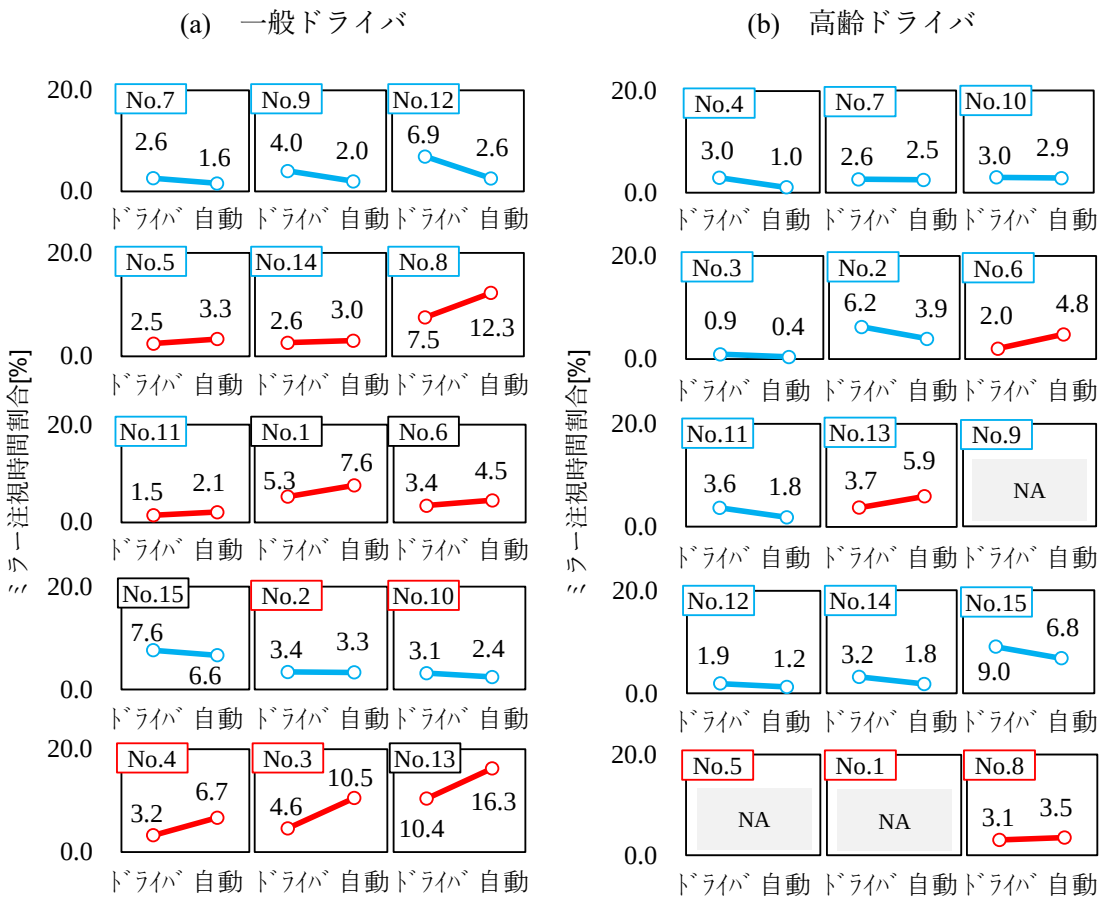


図 3-12　一般ドライバと高齢ドライバの個人別ミラー注視時間割合

ミラー注視時間割合が増加しているにも関わらず周辺認知行動に関する主観評価値が低下しているドライバが両方の年齢グループにいた(一般：No.5, 14, 8, 11, 10 高齢：No.6, 13)。これらのドライバは確認行動が増えた一方で、目でとらえた情報の認知力が低下していた可能性がある。周辺認知行動に関する過去の研究から、自動運転レベル 2 作動下では目線がよく動いていたとしても目でとらえた情報を認識しているとは限らない。自動運転レベル 2 を使うことで周辺認知行動に対する意識が低下するためである（例えば、de Winter, J.C.F. (2019, 2014) [28, 29]，Y. Chung-san (2014) [30]，L. Petersen ら(2019) [31])。また、Lisa J.Molnar ら（2017）は自動運転レベル 2 を使用中の高齢ドライバは注視行動の分散が小さくなることを報告している [47]。高齢ドライバのミラー注視時間割合の低下に関する本実験結果は、高齢ドライバの周辺認知行動の低下における既往研究と同様な特性が表れたものと考えられる。

3.3.5.4　ミラー注視行動の結果に関するまとめ

周辺認知行動として、右サイドミラー及びルームミラーへの注視頻度・時間、両ミラー注視時間割合について、運転タイプ間、グループ間で比較した。一般・高齢ドライバの個人別についても分析した。自動になることで、制御系をシステムに任せるため、周辺認知行動のレベルが、一般ドライバ、高齢ドライバとも低下する結果となった。結果を以下にまとめる。

1) ミラーの注視頻度を自動運転レベル 2 とドライバ運転で比較した結果、一般・高齢ドライバ共に、右サイドミラーへの注視はほぼ同じ頻度であった（差はなかった）。一方、一般・高齢共に、自動運転レベル 2 でのルームミラーの注視頻度は、ドライバ運転より少なくなった。
2) ミラーの注視時間を自動運転レベル 2 とドライバ運転で比較した結果、高齢・一般ドライバとも、右サイドミラーの注視時間は自動運転レベル 2 を使用した時にドライバ運転よりも長くなった。また、ルームミラーについても一般ドライバは同様の傾向となった。高齢ドライバのルームミラーを除いて、自動運転レベル 2 での注視時間はドライバ運転のそれより長くなる傾向となった。
3) ミラーの注視頻度を一般ドライバと高齢ドライバで比較した。注視対象が右サイドミラーのとき、自動運転レベル 2 とドライバ運転で注視頻度について高齢ドライバと一般ドライバの差はなかった。一方、注視対象がルームミラーのとき、自動運転レベル 2 とドライバ運転の両者において高齢ドライバは一般ドライバより注視頻度が少なくなった。
4) ミラーの注視時間を一般ドライバと高齢ドライバで比較した。高齢ドライバの右サイドミラーへの注視時間は自動運転レベル 2 とドライバ運転の両者において一般ドライバより短くなった。また、自動運転レベル 2 使用時の高齢ドライバのルームミラーへの注視時間は一般ドライバより短くなった。ドライバ運転では同程度の注視時間であった。
5) 走行中のミラーの注視時間割合について一般ドライバと高齢ドライバを比較した。自動運転レベル 2 を使用した時の高齢ドライバのミラー注視時間割合は一般ドライバに比べて低くなっていた。ドライバ運転では高齢ドライバと一般ドライバで差はなかった。
6) ミラーの注視時間割合について、一般ドライバと高齢ドライバを個人別に分析した。自動運転レベル 2 を使用した時にミラー注視時間割合が低下した一般ドライバは 15 名中 6 名だった。そのうち 3 名の一般ドライバは周辺認知行動に関する主観評価値が低下していた。自動運転レベル 2 を使用した時にミラー注視時間割合が低下した高齢ドライバは 12 名中 9 名だった。そのうち 7 名の高齢ドライバは周辺認知行動に関する主観評価値が低下していた。

実験時は常時側方を通過する車両が存在したことで、右サイドミラーへの注視は、自動

運転レベル 2 とドライバ運転で変化はなかったものとみられる。一方、アクセル・ブレーキ操作をすることがなくなったことで、高齢ドライバは後方車両との速度差を意識することがなくなり、ルームミラーの注視頻度が減少したと考えられた。ドライバ運転との比較、一般ドライバとの比較から見ても、高齢ドライバは自動運転レベル 2 に依存していた走行となっていたと考えられる。高齢ドライバの周辺認知に関する先行研究では、高齢ドライバは自動運転レベル 2 への過信・依存によって、周辺認知行動に対する低下の影響が一般ドライバよりも大きいという報告がある（例えば、C. Schwarz ら, 2019 [69]; Ho, G. Kiff ら, 2005 [70]）。

ミラー注視時間割合が増加しているにも関わらず周辺認知行動に関する主観評価値が低下しているドライバが両方の年齢グループにいた。これらのドライバは確認行動が増えた一方で、目でとらえた情報の認知力が低下していた可能性がある。周辺認知行動に関する過去の研究から、自動運転レベル 2 作動下では目線がよく動いていたとしても目でとらえた情報を認識しているとは限らない。自動運転レベル 2 を使うことで周辺認知行動に対する意識が低下するためである（例えば、de Winter, J.C.F. (2019, 2014) [28, 29], Y. Chung-san (2014) [30], L. Petersen ら(2019) [31]）。

3.4 まとめ

本章は、高速道路での自動運転レベル 2 における一般及び高齢ドライバの客観・主観的な周辺認知行動と合流部におけるオーバーライドの状況について分析した。一般ドライバ 15 名と高齢ドライバ 15 名が自動運転レベル 2 とドライバ運転で約 30[㎞]の高速道路区間を走行した。周辺認知行動に関する主観評価値、ミラー注視行動、合流部周辺でのオーバーライド発生状況について計測し、各グループ間・各運転タイプ間で比較を行った。実験参加者に対して、タスクを与えることなく車間距離の維持や走行車線の維持に対して制限を与えることはなかった。そのような実験走行環境で、自動運転レベル 2 の使用が各年齢のドライバの周辺認知行動に与えた影響及び合流部周辺でのオーバーライド状況を明らかにした。結果は以下にまとめる。

1) 本線の左車線を実験車両が走行している際に、合流車両が存在し、一般ドライバと高齢ドライバがオーバーライドによって合流車両との接近を回避したシーンがあった。一般ドライバは、合流部手前で事前に車線変更することで合流車両との接近を回避した。高齢ドライバは、ブレーキペダルを踏んで自動運転レベル 2 を解除し、自車の速度を落とすことによって合流車両との接近を回避した。ドライバ運転時は、両グループともに車線変更による回避行動が主であった。高齢ドライバのオーバーライドは、自動運転レベル 2 とドライバ運転で違いが見られる結果となった。
2) 自動運転レベル 2 の使い方に関する主観評価値を高齢ドライバと一般ドライバとで比較した結果、高齢ドライバは、一般ドライバに比べて自動運転レベル 2 の作動方法を難しく、作動状態を分かりづらいと感じていた。合流車両への確認意識に関する主観評価値を高齢ドライバと一般ドライバとで比較した結果、高齢ドライバは、一般ドライバに比べて合流車両を確認できなかったと感じていた。
3) ミラー注視頻度を自動運転レベル 2 とドライバ運転で比較した結果、一般・高齢ドライバとも右サイドミラーの注視頻度は、両運転タイプで同程度となった。一方、一般・高齢ドライバとも、自動運転レベル 2 でのルームミラーの注視頻度は、ドライバ運転より少なくなった。一般と高齢ドライバを比較したところ、右サイドミラーの注視頻度は、一般と高齢ドライバの間に差は見られなかった。自動運転レベル 2 使用時のルームミラーの注視頻度は、高齢ドライバの方が一般ドライバよりも少なくなっていた。
4) ミラー注視時間を自動運転レベル 2 とドライバ運転を比較した結果、高齢ドライバのルームミラーを除いて、自動運転レベル 2 でのミラー注視時間はドライバ運転より長くなった。一般と高齢ドライバを比較した結果、高齢ドライバの右サイドミラーへの注視時間は、両運転タイプにおいて一般ドライバより短くなった。自動運転レベル 2 使用時の高齢ドライバのルームミラーへの注視時間は、一般ドライバより短くなった。ドライバ運転では、一般と高齢ドライバのルームミラーへの注視時間は、同程度であった。

5) 自動運転レベル 2 の周辺認知行動に関する主観評価値について個人別に分析した。自動運転レベル 2 の使用により主観評価値の低下が多くなった一般ドライバは 15 名中 7 名であり、全体の半数以下であった。最も年齢の若い(23 歳)ドライバは周辺認知行動に関する主観評価値の全体について満点を示していた。高齢ドライバ全体の特徴として、主観評価値の低下が多くなったドライバは 15 名中 12 名であり、半数以上だった。

6) ミラーの注視時間割合について、一般ドライバと高齢ドライバを個人別に分析した。分析では、主観評価値の個人分析との対応も行った。自動運転レベル 2 を使用した時にミラー注視時間割合が低下した一般ドライバは 15 名中 6 名だった。そのうち 3 名の一般ドライバは周辺認知行動に関する主観評価値が低下していた。自動運転レベル 2 を使用した時にミラー注視時間割合が低下した高齢ドライバは 12 名中 9 名だった。そのうち 7 名の高齢ドライバは周辺認知行動に関する主観評価値が低下していた。

高齢ドライバは自動運転レベル 2 への過信・依存によって、周辺認知行動に対する低下の影響が一般ドライバよりも大きいという報告がある（例えば、C. Schwarz ら, 2019 [69]; Ho, G. Kiff ら, 2005 [70]）。福田（2009）[71]は、69～80 歳の高齢ドライバは運転行動に影響を与えると思われる対象物に注意を向けるタイミングが遅くなる傾向があり、何らかの判断を行う際、それを急ぐあまり周りの状況を的確に把握することなく次の運転行動に移る場合があることを明らかにしている。本研究結果からは、高齢ドライバは、自動運転レベル 2 へ運転を頼った状態になり、周辺認知状況が低下していたと考えられる。本研究との結果を交えて考察すると、周辺認知状況の低下によって、合流車両の認知に遅れがあり、自動運転レベル 2 の使い方に対する不安から早く簡単な減速によるオーバーライドを合流部で行ったと考えられる。周辺認知状況が低下したことで合流部でのオーバーライドに影響が表れた一方で、高齢ドライバは安全確認への意識の維持を一般ドライバより高く評価した。これは、高齢ドライバの自己評価の高さから現れた結果であると考えられる。実際に、鈴木（2010）[53]蓮花ら（2003）[52]は、高齢ドライバは安全運転への自己評価は高い一方で実際の運転行動とは合致しない点がある、意識と行動のミスマッチといった高齢ドライバの問題点を挙げている。

一般ドライバは、高齢ドライバに比べて周辺認知行動の低下は大きくなかった。オーバーライドについてもドライバ運転と自動運転レベル 2 で差異は見られなかった。しかし、一般ドライバは周辺認知行動に関する主観評価において、安全確認への意識の維持や交通状況への意識の維持に対して懸念を示していた。さらに長距離や長時間の運転となる時、一般ドライバについても合流部で対策を講じる必要があると考えられる。また、周辺認知行動に関する主観評価とミラー注視時間割合の個人別分析で、ミラー注視時間割合が増加しているにも関わらず周辺認知行動に関する主観評価値が低下しているドライバがいた。これらのドライバは確認行動が増えた一方で、目でとらえた情報の認知力が低下していた

可能性がある。周辺認知行動に関する過去の研究から、自動運転レベル 2 作動下では目線がよく動いていたとしても目でとらえた情報を認識しているとは限らない。自動運転レベル 2 を使うことで周辺認知行動に対する意識が低下するためである（例えば、de Winter, J.C.F. (2019, 2014) [28, 29]，Y. Chung-san (2014) [30]，L. Petersen ら(2019) [31]）。

本研究では、一般ドライバと高齢ドライバそれぞれの周辺認知状況の低下と、それによる合流部での合流車両の認知遅れを懸念する結果を得た。準備状態が低下した状態で走行を続ければ、高速道路の合流部・分流部・事区間・本線料金所などで起きるリスク事象への対応が遅れ、対応の遅れから事故の発生が懸念される。これに対し、合流部での自動運転車を支援する動きが必要となる。合流部での支援は、HMI による支援とセンシングによる支援があると考えられる。

合流する車両への HMI による支援については、丸山ら（2021）[75]の研究がある。丸山らは、高速道路合流部における AR を用いた HMI による合流行動支援とその有効性の検証を行っている。丸山らは、ARを用いてドライバに対して危険な合流タイミングおよび位置を半透明の壁で表示した。また、アイコンを右ドアミラーに表示する方法、および音声によって合流車の存在を警告する方法による情報提示を行った。これらの有効性を確認するため、VR ドライビングシミュレータを用いて実験を行い、参加した 12 名の合流時の視線および運転挙動を計測した。実験の結果から、AR表示の半透明の壁を用いて危険な合流タイミングおよび位置を提示することによって、本線を確認するためのドライバの負荷が小さくなり、その他の情報提示を行った時と比較して合流のタイミングに一定のまとまりが見られた。ARを用いて自車が危険な合流タイミングとなっていることをドライバに提示することで、自車のドライバが適切な行動を容易に選択できるようになることを示唆している。

合流する車両への対策だけではなく、本線を ACC で走行しているドライバへの合流部での支援についても研究が進められている。河合ら（2021）[76]は、高速道路本線で ACC を用いた運転を行っているドライバの合流車との錯綜を軽減するために、事前の速度調整装置として走行車線中央に埋め込んだ速度誘導灯を提案した。ドライビングシミュレータを用いて 46 名の実験参加者で走行実験を行った結果、速度誘導灯の意図を説明した実験参加者は、合流部のノーズ端の上流で速度誘導灯の指示に合わせた適切な速度調整を選択していた。速度誘導灯区間はノーズ端から 360m 手前で始まり、ドライバは早めに ACC を OFF にして速度誘導灯のフローに従って速度調整をしていた。これにより、合流車両とぶつからない合流となり、ドライバが感じる合流車両による主観的な危険度も低くなったことを示している。

実際に、高速道路本線の合流車線手前で本線を走行する車両や合流車両をセンシングし、それぞれの車両の速度、車間距離、車長などの情報をドライバや自動運転車に提供する合流支援システムの提案が行われている [72]（北嶋ら, 2020）。菊池ら（2021）[73]は、自動運転車両の円滑な走行を支援するために路車間通信を用いた合流支援システムを検討し、導入による車両挙動安定性への効果を評価している。国土技術総合研究所（2021）[74]は、「路車

協調 ITS による自動運転の実現に向けた取り組み」の中で、合流支援情報提供システムを報告している。これは、高速道路の合流部において、本線の交通状況をセンサで把握し、合流しようとする自動運転車両に情報提供することで、円滑な合流を支援する仕組みである。本線走行車両と横並びにならないように、合流しようとする車両の走行速度を制御する仕組みを提案している。

国総研の取り組みの様に、合流部周辺の状況をセンシングできれば、合流する際のドライバに、道路側からの合流部の情報提供を事前に行うことができる。その情報をドライバの認知をサポートする HMI を介してぶつからない合流の仕組みを構築することが可能となる。この様に、センシングと HMI によって、周辺認知状況の低下がリスクの顕在化にならないような協調が必要である。

第 4 章　先行車両減速場面での ACC 走行によるドライバの危険感への影響

4.1　はじめに

近年、運転支援システムの技術革新が進んでおり、市販の車両にも Adaptive Cruise Control (ACC)が普及されている。ACC は同一車線上に存在する先行車両との車間時間をセンサから計測し、ドライバが選択した ACC の車間時間の設定以下にならないように速度を制御するシステムである（ISO, 1999）[34]。ACC を使用することで、ドライバの運転負荷軽減、走行の安全性向上などが期待できる（例えば、花守ら, 2021 [51]；de Winter ら, 2014 [28]；Lee ら, 2006 [77]）。また、ACC は運転の自動化を実現するための重要な技術である。

現在の市販されている車両に搭載している ACC は、先行車両が急減速する場面のようなイレギュラーな追従状況には対応していない（伊藤(2008) [35]；H. U. Ahmed ら(2021) [36]）。イレギュラーな追従状況は、工事などによる車線規制区間の開始地点・高速道路上の事故地点・故障車の地点で発生する。ACC 車両がイレギュラーな追従状況に直面した際に、ACC の車間時間設定や先行車両の減速がドライバの危険感に対して影響を与え、危険感の増大が大きい場合、ドライバは、ACC へ介入することが考えられる。イレギュラーな追従状況であっても、ドライバが危険を感じない、または危険感増大を起因とした ACC への介入が発生しないような車間時間設定の知見が重要である。

一方で、ACC の車間時間設定が具体的に何秒であるときに、ドライバの危険感がどれほどの値になるのか、ACC への介入を起こさないためにはどれほどの車間時間設定が必要となるのかといった知見はあまり報告されていない。この知見は、ドライバの危険感が高まりやすい状況での車間時間設定の在り方を検討するのに有用であり、ACC の継続的な使用範囲の拡大に貢献する。例えば、第 5 章で述べるような冬期道路環境での ACC の車間時間設定を検討することに応用できると考えられる。

そこで本章では、乾燥路面で ACC を用いた追従走行中の先行車両減速と ACC の車間時間設定がドライバの危険感に与える影響について検討する。その結果から、ドライバが ACC に介入しないような車間時間設定を明らかにする。方法論を構築し、冬期道路環境に適用することを見据えて、本章ではまず乾燥路面をターゲットとして、以下を実施する。

1) 先行車両の減速接近場面において、TTC が最小となるとき（TTC_{min}）のドライバの主観的危険感を実車走行実験から明らかにする。
2) 先行車両減速場面を対象とした ACC 車両による追従走行シミュレーションを行う。ACC の車間時間設定及び先行車両の減速条件を変化させた時の $1/TTC_{min}$ を予測する。
3) 実車走行実験とシミュレーションの結果をもとに、先行車両減速場面での ACC 走行によるドライバの主観的危険感への影響を検討する。
4) ACC の車間時間設定がドライバの主観的危険感に与える影響を明らかにし、ACC への介入を起こさないために必要な車間時間設定を示す。

4.2　実車実験の方法

4.2.1　実車実験の目的

本節では、高速道路における実環境下での追従走行において、先行車両に接近する際のドライバの追突に対する危険感を明らかにすることを目的とする。先行車が減速したときのドライバの追突に対する危険感を測定するために実車走行実験を実施した。ドライバは ACC を使用した運転と ACC を使用しない運転（以降、ドライバ運転）で追従走行を行った。先行車両減速場面における TTC 最小値を用いて、ドライバの追突に対する危険感をモデル化した。

4.2.2　実験参加者

安全に考慮し、3 名の運転に慣れたドライバが実験に参加した。すべての実験参加者は年間走行距離 3,000[km]以上、高速道路を月数回以上運転していた。実験参加者の平均年齢は 46 歳、性別は男性 2 名女性 1 名であった。平均運転歴は 27 年であった。実験参加者は全員 ACC の使用経験があり、ACC の使い方やシステム限界について理解していた。

4.2.3　実車実験の日時と走行コース

実験走行は 2020 年 1 月 27 日から 1 月 30 日の日中に行った。実験区間は札樽自動車道の銭函 IC から朝里 IC である。実験区間は片側二車線で規制速度が 80[km/h]の高速自動車国道である。1 月 27 日、28 日の天候が晴れ、29 日、30 日の天候が弱い雨であった。弱い雨があったが、水膜が路面に形成されるようなことはなく、ほぼ乾燥路面と同等の路面であった。本実験の走行コースを図 4-1 に示す。

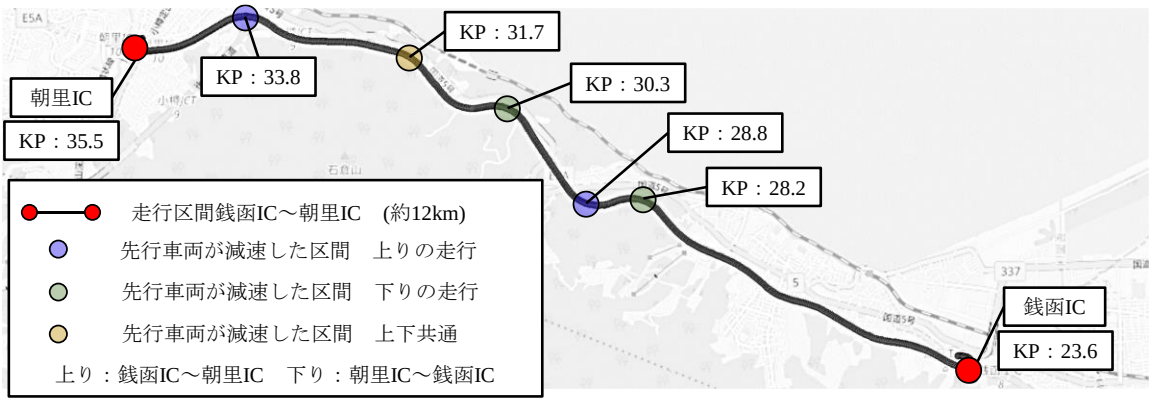


図 4-1　実車実験おける走行コース

4.2.4　実験条件

4.2.4.1　追従走行の方法

追従状態を再現するため、先行車両と ACC を搭載した追従車両の 2 台を実験車両として用意した。実験参加者は追従車両を運転した。先行車両と追従車両は共に約 65[km/h]の一定速度で走行した。実験車両に搭載している ACC の車間時間設定は約 1.3[sec]、1.8[sec]、2.3[sec]の 3 種類だった（実験車両の取り扱い説明書より）。この 3 種類の車間時間設定のうち、最も短い設定（=1.3[sec]、以降 ACC(S)）と最も長い設定（=2.3[sec]、以降 ACC(L)）を使用して実験を行った。先行車両が減速したときのドライバの追突に対する危険感を明らかにするために、広い実験条件が望ましいと考えた。加えて、同様の追従条件で実験参加者はドライバ運転でも走行を行った。

4.2.4.2　先行車両の減速区間

実験走行中に先行車両はブレーキによって減速をかけて、追従車両と接近した。先行車両は 2[sec]で 20[km/h]の減速を目安にした。減速箇所数は銭函 IC から朝里 IC で 3 箇所、朝里 IC から銭函 IC で 3 箇所の計 6 箇所を設定した（図 4-1）。

4.2.5　計測

4.2.5.1　先行車両減速場面でのドライバの追突に対する主観的な危険感

Kondoh ら（2008）は先行車両に接近する際のドライバの追突に対する主観的な危険感（以降、RF（Risk Feeling））が 1/TTC でモデル化できることを明らかにした[63]。先行車両の減速ごとに、追従車両が減速から車速を回復したとき、RF をドライバにヒアリングした。ドライバは RF を 10 段階（危険感小 1←→大 10）で口頭によって回答した。解析時に 1～10 点の点数を実験参加者が回答した RF に付与した。なお、本実験では、実験参加者が口頭で瞬時に回答しやすい 10 段階の尺度を用いた。10 段階尺度による主観評価は過去の研究でも使用されている（例えば、T. Liu ら, 2019 [78]; B. Barabino ら, 2018 [79]）

4.2.5.2　走行速度及び車間距離の計測

A Real Time Kinematic - Global Positioning System（以降、 RTK-GPS）によって先行車両と追従車両の車間距離と走行速度を連続的に記録した。両車両に搭載した RTK-GPS は、株式会社アイサンテクノロジーの提供によるものである。先行車両と追従車両には同一の RTK-GPS レシーバーを搭載した。RTK-GPS は、既知点から補正された観測情報を移動局に送信することで、移動局の位置を決定する高精度なリアルタイム計測手法である。RTK で受信しているときの精度は直線方向に対し 0.03[m]である。2 点の RTK-GPS レシーバー設置個所の相対距離の算出にはヒュベニの式を用いた（K. Hubeny, 1959 [80]；H. Sato ら, 2017 [81]）（式 4-1 から 4-3）。実験車両の延長と 2 点の RTK-GNSS レシーバー設置個所の相対距離から先

行車両と追従車両の車間距離を求めた（式 4-4）。システムのサンプリング及び出力レートは 10[Hz]であった。

$$d_{bet.GPS}^{t} = \sqrt{(M^t \cdot d_{lat}^{t})^2 + (N^t \cdot cos\,(L_{lat}^{t}) \cdot d_{lon}^{t})^2} \tag{4-1}$$

$$M^t = \frac{6356752}{\sqrt{\{1 - 0.006694 sin^2(L_{lat}^{t})\}^3}} \tag{4-2}$$

$$N^t = \frac{6378137}{\sqrt{1 - 0.006694 sin^2(L_{lat}^{t})}} \tag{4-3}$$

$d_{bet.GPS}^{t}$ ：時間 t における 2 点の RTK-GPS アンテナ設置箇所の距離 [m]
d_{lat}^{t} ：時間 t における 2 点の RTK-GPS アンテナ設置箇所の平均緯度 [rad]
d_{lon}^{t} ：時間 t における 2 点の RTK-GPS アンテナ設置箇所の緯度差 [rad]
L_{lat}^{t} ：時間 t における 2 点の RTK-GPS アンテナ設置箇所の経度差 [rad]
M^t ：時間 t における子午線曲率半径 [m]
N^t ：時間 t における卯酉線曲率半径 [m]

$$D_{PF}^{t} = d_{bet.GPS}^{t} - (l_{GR} + l_{GF}) \tag{4-4}$$

D_{PF}^{t} ：時間 t における先行車両と追従車両の車間距離 [m]
l_{GR} ：先行車両の RTK-GPS アンテナ設置箇所から車両後端までの距離 [m]
l_{GF} ：追従車両の RTK-GPS アンテナ設置箇所から車両先端までの距離 [m]

4.2.5.3 ACC の作動状況の記録

先行車両が減速した際の追従車両の ACC 作動状態（ACC-ON または OFF）を計測した。先行車両が減速接近し TTC が低い値となり、追突リスクを感じたドライバがブレーキペダルを踏むと ACC は解除される。ACC 解除後、走行状態はドライバ運転に移行する。追従車両の ACC 作動状況は車両の Controller Area Network（CAN）から計測した。

4.2.5.4 実験設計

実験走行はドライバ運転、ACC(S)、ACC(L)の 3 つの運転タイプで行われた。銭函 IC～朝里 IC の 12km 区間における 3 往復を 1 セッションとした。1 回の往復で 1 つの運転タイプを割り当てた。1 回のセッションでは、ドライバ運転、ACC(L)、ACC(S)の順で走行実験を行った。ドライバ運転の車間距離が ACC 走行から影響を受けないように、ドライバ運転による走行実験を先に行った。実験参加者 3 名のうち 1 名は 1 セッションのみ、他の 2 名は 2 セッションを行った。1 往復毎に 10 分の休憩を挟み、1 回のセッションの所要時間は約 2 時間であった。

4.2.5.5 実験手順

実験開始時に、実験スタッフは 30 分かけてスケジュール、実験概要、減速後の主観評価回答などを説明した。その際の主な教示は以下である。

1) ドライバ運転時の車間距離の維持については、普段通りの運転を行ってください。
2) スタート地点の IC からゴール地点の IC までの区間で、先行車両が何度か減速します。
   その際は、ACC を使用していても普段通りの安全運転を心がけてください。
3) 先行車両の減速が終了した際、追突に対してどれほど危険を感じたかをお聞きします。
   先行車両への追突に対して感じた危険感を直観的に回答してください。1 を危険感小、
   10 を危険感大とし、10 段階で口頭によって回答してください。

実験説明後、実験説明後に実験参加者全員が同意書にサインをした。

4.3　実車実験の調査結果

4.3.1　データ取得結果

ドライバ運転で 30 回、ACC 走行で 60 回、計 90 回の先行車両減速を想定した。しかし、工事区間や周辺の交通状況の影響で先行車両が減速をかけられなかった場面があった。そのような状況はドライバ運転では 4 回、ACC 走行では 6 回あった。そのため主観評価及びそのほかの分析における先行車両減速時のデータ数はドライバ運転が 26 回、ACC 走行が 54 回の計 80 回となった。ACC 走行時の 54 回の減速のうち、12 回の減速で実験参加者はブレーキペダルを踏んで ACC によるブレーキを中断し、自ら減速することを選択した。

4.3.2　RF の結果

先行車両が減速した際の追突に対するドライバの主観的な危険感（以降、RF）の平均値を図 4-2 に示す。ドライバ運転の時、RF の平均値は 1.8(Std.=0.8,n=26)となった。ACC 走行の時、RF の平均値は、ドライバが ACC(L)を使用したとき 1.5(Std.=0.6,n=27)であり、ACC(S)を使用したとき 3.7(Std.=1.9,n=27)となった。RF の平均値は、ACC(S)を使用したときに最も大きくなった。

ドライバ運転の走行では、ドライバにとって安全と感じる車間距離で走行できる。減速の強さもまたドライバ自身が制御できるため、先行車両との追突に対しての危険感が大きくならなかった。同様に、ACC(L)を使用した走行では、ACCがとる車間距離が広かったため、先行車両と接近しづらく、危険感が大きくならなかった。一方で、ACC(S)を使用した走行では、ACC がとる車間距離が狭かったため、先行車両と短時間で接近したことから危険感が他と比べて大きくなったと考えられる。

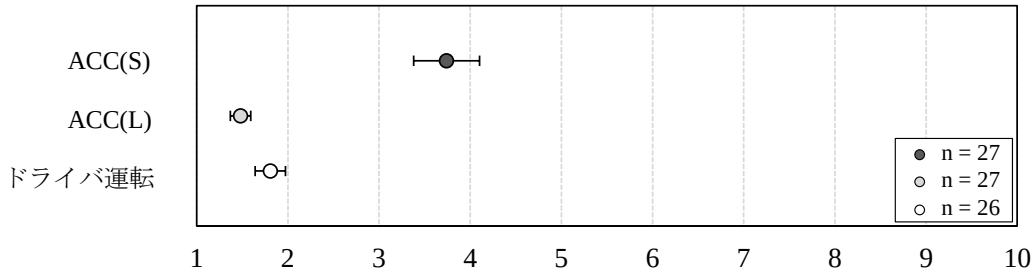


図 4-2　各運転タイプにおけるドライバの RF に関する平均値

4.3.3　先行車両減速時の追従状況に関する基礎データ

図 4-3 は先行車両が減速し始めてから速度が回復するまでの先行車両の速度・追従車両の速度・車間距離・TTC・THW の変化である。図 4-3(a)、(b)、(c)はそれぞれ、(a)が ACC(L)、(b)が ACC(S)、(c)がドライバ運転の走行ケースを示している（1 月 30 日の実験参加者の走行）。

ドライバが ACC(L)を使用したケース（図 4-3(a)）では、先行車両は 2 秒間で 67[km/h]から 50[km/h]まで減速した。追従車両の先行車両への対応はすべて ACC の減速であり、先行車両が減速し始めてから約 2[sec]で ACC は緩やかに減速した。TTC は 11.5[sec]、THW は 2.2[sec]まで減少した。先行車両が減速し始めた時の車間距離は 44[m]であり、TTC 最小時の車間距離は 36[m]であった。

ドライバが ACC(S)を使用したケース（図 4-3(b)）では、先行車両は 2 秒間で 68[km/h]から 50[km/h]まで減速した。そのときの TTC は約 6.0[sec]、THW は 1.0[sec]まで減少した。TTC の最小値は ACC(L)を使用した時と比べて 5[sec]小さい値であった。先行車両が減速し始めた時の車間距離は約 25[m]であり、TTC 最小時の車間距離は約 18[m]であった。

ドライバ運転で走行したケース（図 4-3(c)）では、先行車両が減速し始めてから約 2[sec]でドライバは減速を始めた。そのときの TTC は 7.7[sec]、THW は 1.4[sec]まで減少した。先行車両が減速し始めた時の車間距離は約 32[m]であり、TTC 最小時の車間距離は 27[m]であった。

ACC(L)は TTC の推移がドライバ運転と類似していること、十分な車間距離を保って走行していることからドライバが大きな危険感を感じることは少ない。一方で ACC(S)は THW の値が ACC(L)に比べて小さいためドライバの危険感は高まりやすい。

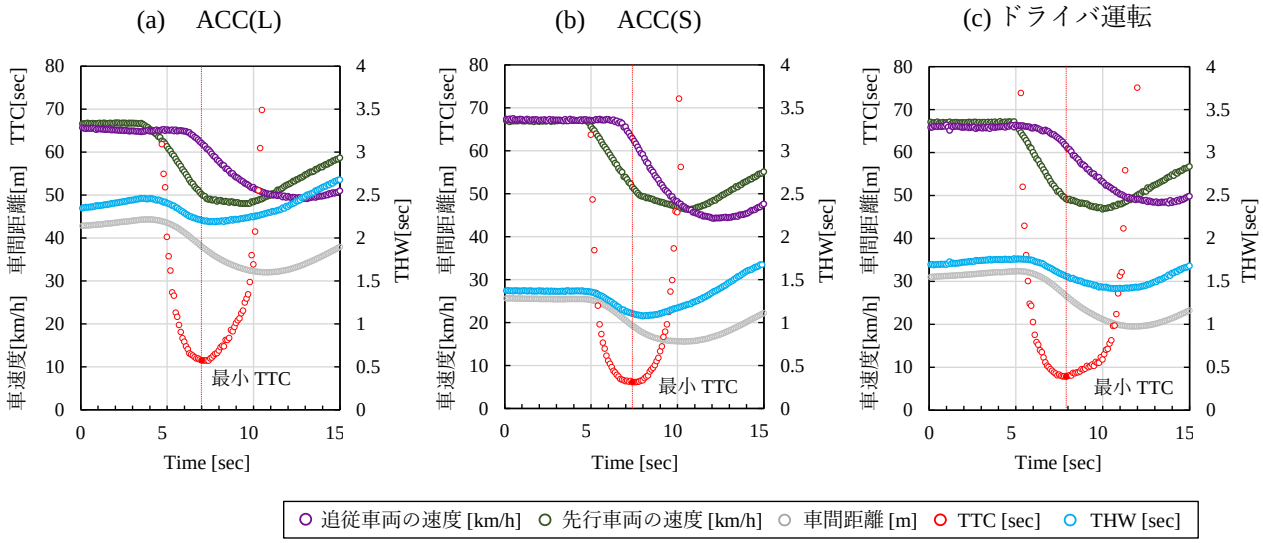


図 4-3　先行車両減速時の各運転タイプにおける追従状況の基礎データ

4.3.4　TTC の最小値と THW との関係

先行車両減速時の TTC の最小値と TTC が最小となる時の THW を図 4-4 にプロットした。横軸は、先行車両減速時の TTC の最小値を逆数[1/sec]で表し（以降、$1/TTC_{min}$）、縦軸は TTC が最小となる時の THW[sec]を表す。白点がドライバ運転、薄いグレーの点が ACC(L)、濃いグレーの点が ACC(S)のケースを示している。n=80 回分の先行車両減速時の状況を示している。

THW1.5[sec]～1.0[sec]に分布している濃いグレーの点は ACC(S)の走行ケースであり、THW2.0[sec]～2.5[sec]に分布している薄いグレーの点は ACC(L)の走行ケースである。THW が 2.0[sec]～1.5[sec]の間に分布している ACC(L)と ACC(S)の点は、ACC の減速途中でドライバがブレーキペダルを踏み ACC に介入した時のものである。ドライバ運転のケース（白点）の THW は 2[sec]以下に分布しており、ACC(S)に近いまたは ACC(S)と ACC(L)の間の位置で分布した。ACC(S)は THW が短い走行のため、先行車両の減速によって TTC の最小値が他と比べて小さい値となる。一方で、ACC(L)は THW が長い走行のため、先行車両の減速によって TTC の最小値が他と比べて大きい値となる。

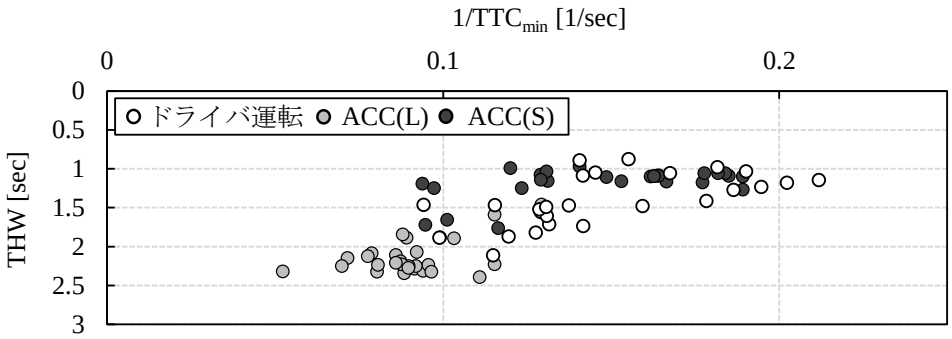


図 4-4　各運転タイプにおける先行車両減速時の $1/TTC_{min}$ と THW の関係

4.3.5　$1/TTC_{min}$ を指標とした RF のモデル化

TTC は同一車線上で同じ進行方向の先行車両と追従車両が衝突するまでの残り時間を示している（K. Vogel, 2003）。K.Vogel は TTC が小さいとき危険な状況が実際に発生していることを示し、先行車両との追突リスクの指標として使用できることを示した [58]。また、Kondoh ら（2008）は先行車両接近場面の先行車両への追突に対するドライバの主観的な危険感(以下、RF(Risk Feeling))は 1/TTC で定量化できることを示した（式 4-5）[63]。式 4-5 の A は定数である。TTC はある相対速度で追従車両が先行車両に接近し続けている中で、その状態がそのまま継続すれば接触が予見される場面における危険感を示している（近藤ら, 2005）[82]。TTC の逆数はドライバの視覚入力である接近する先行車両に対する視覚変化率と等価であること（日本視覚学会, 2000）[62]、TTC の値が制動開始タイミングを判断する指標の一つになっていること（鈴木ら, 2004）[83]が知られており、TTC は顕在的な危険感の要素となっている。

$$RF = \frac{A}{TTC} \tag{4-5}$$

式 4-5 より、先行車両が減速した際の RF は TTC が最小となる時に最大となる。このため、TTC の最小値を分析指標とした。RF のモデルは、RF を目的変数、$1/TTC_{min}$ を説明変数とした線形モデル（LM）とした。式4-5のパラメータAの推定値は、ACC走行（ACC(S)とACC(L)の組み合わせ）とドライバ運転のそれぞれについて、R 3.6.3を用いて最小二乗法によって求めた。

ドライバ運転及び ACC 走行の両者とも、$1/TTC_{min}$ は RF に対して有意な結果となった。ドライバ運転のパラメータ A の値は 12.0 となった(n=26, std.=1.1, t=11.0, p<0.001, R^2値=0.83)。ACC 走行のパラメータ A の値は 21.8 となった(n=54, std.=1.8, t=12.3, p<0.001, R^2値=0.74)。ドライバ運転、ACC(L)、ACC(S)、ACC 走行における $1/TTC_{min}$ と RF の関係を以下に示す（式 4-6、式 4-7)。

$$RF_{ACC} = \frac{21.8}{TTC_{min}} \tag{4-6}$$

$$RF_{Con} = \frac{12.0}{TTC_{min}} \tag{4-7}$$

4.3.6 実車実験のまとめ

ACC を用いて高速道路を走行しているドライバの RF を実車で計測した。ACC を使用した場合の RF はドライバ運転よりも大きくなった。また、実車実験で計測した $1/TTC_{min}$ の値を用いて、 RF を運転タイプ別（ドライバ運転、ACC 走行）にモデル化した。その結果、$1/TTC_{min}$ の値は RF に有意な影響を与えることを確認した。

4.4　先行車両減速場面を対象としたACC車両による追従走行シミュレーション

4.4.1　シミュレーション方法

先行車両減速場面を対象としたACC車両による追従走行シミュレーションにはMATLAB Simulink（MathWorks社）を使用した。追従走行中のACCによる加速度はSimulink内に概説されているAdaptive Cruise Controllerを使用して算出した。

Classical Adaptive Cruise Controllerは従来のACCの方式に従って、時間tにおける先行車両と追従車両の相対距離（車間距離）d_{rel}^t、相対速度v_{rel}^t、追従車両の速度v_{foll}^tを入力として時間tにおける追従車両（ACC）の加速度a_{desACC}^tを出力する（L. Zhaoら, 2013 [84]；B. Aremら, 2006 [85]）。本研究では、Classical Adaptive Cruise Controllerの定数ゲインを初期値である$k_v = 0.4, k_s = 0.2, k_e$ =0.5としてa_{desACC}^tを算出した。

Classical Adaptive Cruise Controllerはd_{rel}^tがドライバの設定した車間距離d_{set}（ACCの車間時間の設定であるTHW_{set}とv_{foll}^tとの積）以下の場合、d_{rel}^tがd_{set}となるような速度制御を行う（式4-8、式4-9）。

$$a_{c1} = k_v\left(v_{lead}^t - v_{foll}^t\right) - k_s\left(THW_{set}\cdot v_{foll}^t - d_{rel}^t\right) \tag{4-8}$$

$$a_{desACC}^t = max[a_{min}, min(a_{c1}, a_{max})] \tag{4-9}$$

a_{c1}	：ACCによる加減速制御の基準値1	[m/sec^2]
v_{lead}^t	：時間tにおける先行車両の加速度	[m/sec]
v_{foll}^t	：時間tにおける追従車両の加速度	[m/sec]
THW_{set}	：ACCの車間時間設定	[sec]
d_{rel}^t	：時間tにおける車間距離	[m]
k_v ,k_s	：定数ゲイン（$k_v = 0.4, k_s = 0.2$）	
a_{desACC}^t	：時間tにおけるACCのシステムが決定した加速度	[m/sec^2]
a_{min}	：ACCが取り得る最小加速度	[m/sec^2]
a_{max}	：ACCが取り得る最大加速度	[m/sec^2]

一方、d_{rel}^tがd_{set}より大きい場合、ドライバが設定した速度であるv_{set}となる走行を行うように車両の速度を制御する（式4-10、式4-11）。

$$a_{c2} = min[k_e\left(v_{set} - v_{foll}^t\right), a_{c1}] \tag{4-10}$$

$$a_{desACC}^t = max[a_{min}, min\left(a_{c2}, a_{max}\right)] \tag{4-11}$$

a_{c2}	：ACCによる加減速制御の基準値2	[m/sec^2]
k_e	：定数ゲイン（k_e =0.5）	

先行車両の挙動をシミュレーションするために必要な入力は、時間tにおける先行車両の加速度$a_{lead.}^t$、時間 t=0 における先行車両の速度$v_{lead.}^{t=0}$、時間 t=0 における先行車両の位置$x_{lead.}^{t=0}$である。時間tにおける先行車両の速度$v_{lead.}^t$は式4-12、時間tにおける先行車両の位

置$x_{lead.}^{t}$は式 4-13 から計算した。

$$v_{lead}^{t} = \frac{1}{s}[a_{lead}^{t}] + v_{lead}^{t=0} \tag{4-12}$$

$$x_{lead}^{t} = \frac{1}{s}[v_{lead}^{t}] + x_{lead}^{t=0} \tag{4-13}$$

v_{lead}^{t} ：時間 t における先行車両の速度 [m/sec]
a_{lead}^{t} ：時間 t における先行車両の加速度 [m/sec^2]
$v_{lead}^{t=0}$ ：時間 t=0 における先行車両の速度（初期値） [m/sec]
$x_{lead}^{t=0}$ ：時間 t=0 における先行車両の位置（初期値） [m]
x_{lead}^{t} ：時間 t における先行車両の位置 [m]
$\frac{1}{s}$ ：積分器（s: ラプラス演算子）

追従車両の挙動をシミュレーションするために必要な入力は、時間 t における ACC のシステムが決定した加速度a_{desACC}^{t}、時間 t=0 における追従車両の速度$v_{foll}^{t=0}$、時間 t=0 における追従車両の位置$x_{foll.}^{t=0}$である。時間 t における追従車両の速度v_{foll}^{t}は式 4-14 で求めた。時間 t における先行車両の位置x_{foll}^{t}は式 4-15 で求めた。先行車両減速に対する ACC の減速応答は遅れ時間が伴うことが本実車実験で観測された。そこで式 4-14 のように、ACC のシステムが決定した加速度a_{desACC}^{t}が実速度に反映されるまでの時間を時定数と定義した。a_{desACC}^{t}が実速度に現れるまでの過程に 1 次遅れの伝達関数$\frac{1}{\tau s+1}$（τ: 時定数、 s: ラプラス演算子）を導入することで時定数を組み込んだ。

$$v_{foll}^{t} = \frac{1}{s}[a_{desACC}^{t}]\frac{1}{\tau s + 1} + v_{lead}^{t=0} \tag{4-14}$$

$$x_{foll}^{t} = \frac{1}{s}\left[v_{foll}^{t}\right] + x_{foll}^{t=0} \tag{4-15}$$

v_{foll}^{t} ：時間 t における追従車両の速度 [m/sec]
a_{desACC}^{t} ：時間 t における ACC のシステムが決定した加速度 [m/sec^2]
v_{foll}^{t} ：時間 t=0 における追従車両の速度（初期値） [m/sec]
$x_{foll}^{t=0}$ ：時間 t=0 における追従車両の位置（初期値） [m]
x_{foll}^{t} ：時間 t における追従車両の位置 [m]
$\frac{1}{s}$ ：積分器（s: ラプラス演算子）
τ ：時定数 [sec]
$\frac{1}{\tau s+1}$ ：a_{desACC}^{t}が速度に反映されるまでの 1 次遅れの伝達関数

時間 t における先行車両と追従車両の車間距離d_{rel}^{t}、TTC（TTC_{sim}^{t}）、THW（THW_{sim}^{t}）は式 4-16、式 4-17、式 4-18 から求めた。

$$d_{rel}^{t} = x_{lead}^{t} - x_{foll}^{t} \tag{4-16}$$

$$TTC_{sim}^{t} = \begin{cases} \dfrac{d_{rel}^{t}}{v_{foll}^{t} - v_{lead}^{t}} & (v_{foll}^{t} > v_{lead}^{t}) \\ \infty & (v_{foll}^{t} \le v_{lead}^{t}) \end{cases} \tag{4-17}$$

$$THW_{sim}^{t} = \frac{d_{rel}^{t}}{v_{foll}^{t}} \tag{4-18}$$

d_{rel}^{t} ：時間 t における先行車両と追従車両の車間距離 [m]
x_{lead}^{t} ：時間 t における先行車両の位置 [m]
x_{foll}^{t} ：時間 t における追従車両の位置 [m]
TTC_{sim}^{t} ：時間 t における TTC [sec]
v_{foll}^{t} ：時間 t における追従車両の速度 [m/sec]
v_{lead}^{t} ：時間 t における先行車両の速度 [m/sec]
THW_{sim}^{t} ：時間 t における THW [sec]

4.4.2 時定数の推定

4.4.2.1 時定数の推定方法

先行車両減速時の ACC 車両の速度応答を式 4-14 から計算するためには、時定数 τ を推定する必要がある。時定数 τ は実車実験の先行車両減速時の ACC による追従走行結果から推定した。

実車実験において、ドライバが ACC(S)と ACC(L)を使用した際の先行車両減速時の追従状況におけるデータ数を 54 回計測した。54 回の内、12 回の先行車両の減速でドライバが ACC によるブレーキを中断し自身で減速することを選択した。この 12 回分のケースを除き、先行車両の減速に対して全て ACC による減速となった 42 回から時定数を決定した。

実車実験から計測した 42 回の先行車両の減速を入力として、TTC_{sim}^{t}を式 4-17 によって計算した。この際、時定数 τ を 0 から 1.5 まで 0.1 秒間隔で変更し、1 回の先行車両の減速の入力に対して 16 パターンのTTC_{sim}^{t}を計算した。実験から計測した先行車両の加減速度$a_{lead.}^{t}$は式 4-19 のように平滑化してから式 4-12 に使用した。式 4-19 による処理結果の例を図 4-5 に示す。

$$a_{lead}^{t} = \frac{1}{5}(a_{lead}^{t-0.250} + a_{lead}^{t-0.125} + a_{lead}^{t} + a_{lead}^{t+0.125} + a_{lead}^{t+0.250}) \tag{4-19}$$

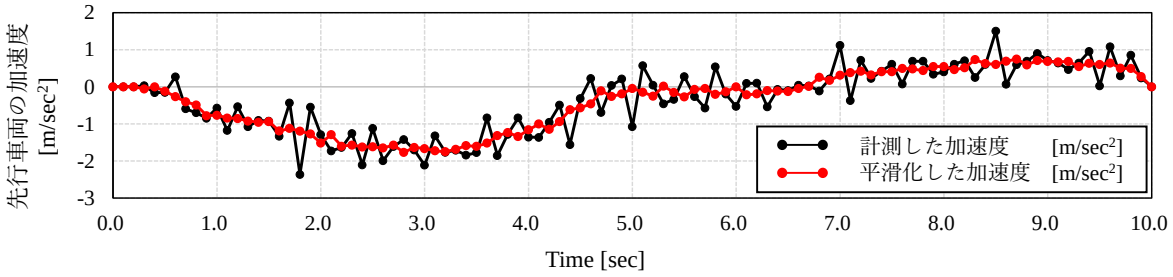


図 4-5 実験から計測した先行車両の加速度の平滑化に関する例

シミュレーションは実車実験による計測と同様 10[Hz]で行った。先行車両の速度が最小となった点までとした（10 秒間)。シミュレーションの初期値は先行車両の速度が最小となった点から 10 秒手前の先行・追従車両の速度、車間距離を設定した(図 4-6)。

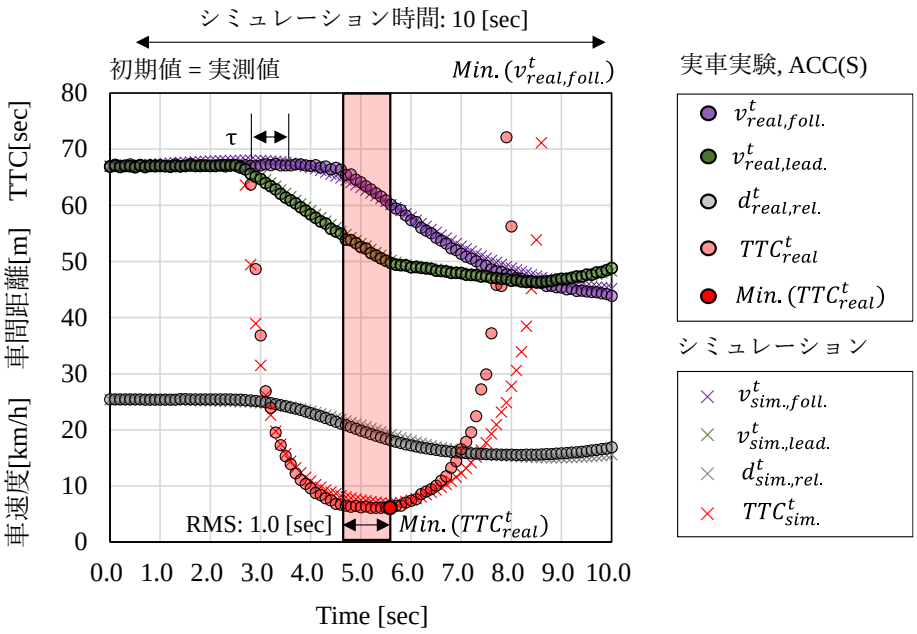


図 4-6　ACC(S)を使用した場合の時定数 τ における先行車両減速時のTTC^t_{sim}とTTC^t_{real}

4.4.2.2　推定した時定数

仮定した時定数 τ を用いて算出したTTC^t_{sim}と実験から計測したTTC^t_{real}の差を Root Mean Square (RMS)で評価した。RMS は TTC^t_{real}が最小となる点から過去 10 点のデータを用いて算出した（式 4-20)。

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{10}\sum_{t=0.1}^{1.0}(TTC^t_{real} - TTC^t_{sim})^2} \tag{4-20}$$

先行車両減速時の TTC に対する平均 RMS（n=42）を時定数 τ 毎に算出した。その結果を図 4-7 に示す。時定数 τ=0 の時が最も平均 RMS の値が大きくなった(τ=0[sec],n=42, Ave.=2.2[sec], std.=1.1[sec])。時定数を大きくしていくと平均 RMS の値が小さくなり、τ=0.8 の時に RMS の値が最小となった(τ=0.8[sec],n= 42, Ave.=0.8[sec], std.=0.7[sec])。τ が 1.5 に近づくにつれ、RMSE の値も大きくなった(τ=1.5[sec],n=42, Ave.=1.2[sec], std.=0.9[sec])。以降の先行車両減速場面を対象とした ACC 車両による追従走行シミュレーションでは τ=0.8[sec]を使用する。

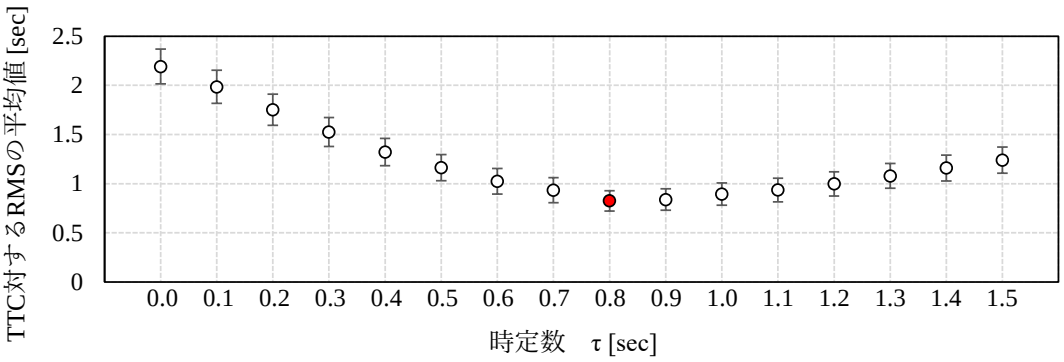


図 4-7　時定数 τ を 0.0~1.5[sec]で変化させた時の TTC に対する RMS の平均値

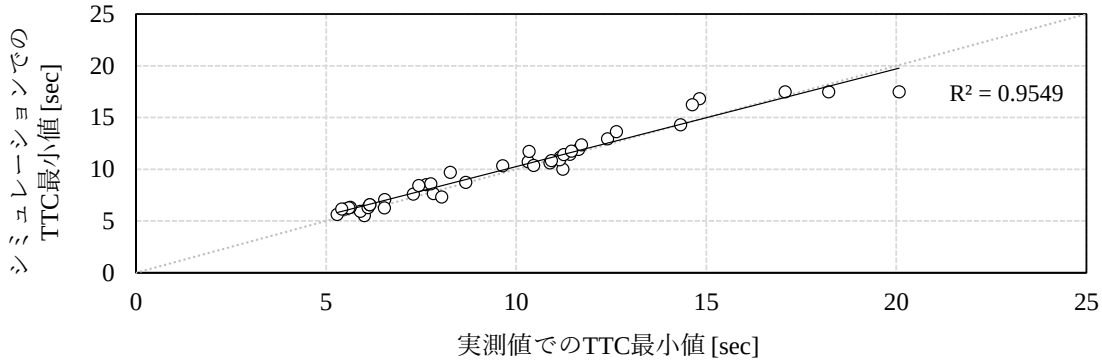


図 4-8　TTC_{min} のシミュレーション値と実測値との比較

4.4.3　TTC_{min} のシミュレーション値と実測値との比較

実車実験から計測した 42 回の先行車両の減速を入力として、TTC_{min} のシミュレーション値を式 4-17 から計算した。入力値に使用する先行車両の減速は、実測値の先行車両の減速を 5 点の移動平均によって平滑化したものである。先行車両の減速に対する ACC の時定数は、0.8[sec]とした。各先行車両の減速に対するシミュレーションでの TTC_{min}（n=42）と実測による TTC_{min}（n=42）とを比較した。

図 4-8 は各先行車両の減速に対する TTC_{min} のシミュレーション値と TTC_{min} の実測値とを比較した結果である。1 プロットにつき 1 回分の先行車両の減速状況を示している。横軸は TTC_{min} の実測値、縦軸は TTC_{min} のシミュレーション値を示している。シミュレーションによって求めた TTC_{min} と実車実験によって計測した TTC_{min} はほぼ一致しており、R^2 値は 0.95 であった。TTC_{min} はシミュレーションによって再現可能であると考えられる。

一定速度かつ ACC の設定と等しい車間時間で先行車両を追従している様な安定した追従状況で先行車両が減速した際に、シミュレーションは実測値を良く再現できると考えられる。実車実験では道路の上り下り勾配や前方車両の有無による先行車両の速度変動などが原因となって、速度差が有る状況や ACC の設定よりも広い車間時間設定となる追従状況で

先行車両が減速する場面があった。このような場面での先行車両の減速がシミュレーションによる TTC_{min} の再現に多少の誤差を与えていたと考えられる。

4.4.4 ACC 車両による追従走行シミュレーション

4.4.4.1 シナリオとパラメータ

時定数 τ=0.8[sec]として、先行車両減速場面を対象とした ACC 車両による追従走行シミュレーションを行った。先行車両と追従車両が 17.5[m/s](63[km/h])の同じ速度で追従走行する場面で、先行車両が減速するシナリオをシミュレーションした。この時、追従車両は ACC を作動させており、ACC の車間時間の設定THW_{set}を 7 パターン検討した(1.3, 1.8, 2.3, 2.8, 3.3, 3.8, 4.3 [sec])。先行車両の減速は 2 秒間とし、3 つの減速パターンとした（0.1g, 0.2g, 0.3g（図 4-9)）。合計 7×3＝21 の組み合わせによるシナリオでシミュレーションを実施した。ACC がとり得る最大減速度は 0.25g とした(伊藤, 2008)。追従走行シミュレーションで設定したパラメータを表 4-1 に示す。

表 4-1　シミュレーションにおけるパラメータ

シミュレーションにおけるパラメータ	値
時定数: τ	0.8 [sec]
先行車両と追従車両の初期速度: $v_{lead.}^{t=0}$ and $v_{foll.}^{t=0}$	17.5 [m/sec]
ACCの設定車速: v_{set}	17.5 [m/sec]
ACCが取り得る最大加速度: a_{max}	0.25g [m/sec^2]
ACCが取り得る最小加速度: a_{min}	0.25g [m/sec^2]
ACCの車間時間設定: THW_{set}	1.3, 1.8, 2.3, 2.8, 3.3, 3.8, 4.3 [sec]
先行車両の減速度: $a_{lead.}^{t}$	0.1g, 0.2g, 0.3g (for 2.0[sec]) [m/sec^2]

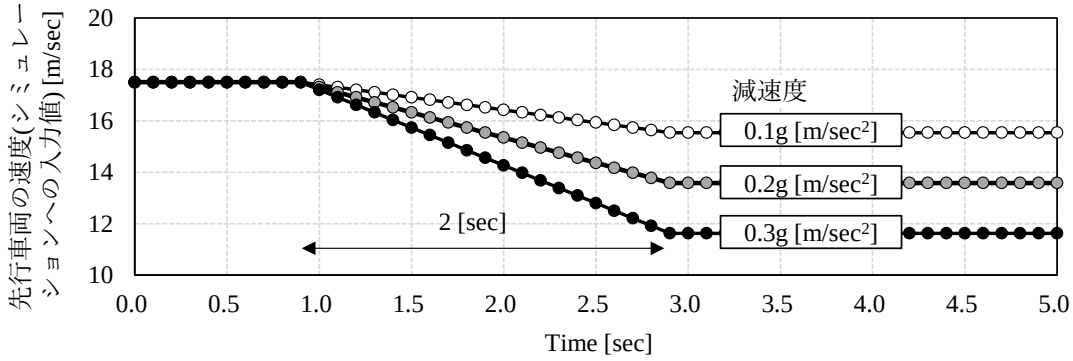


図 4-9　各減速度における先行車両の速度の変化（シミュレーションの入力値）

4.4.4.2　ACC 車両による追従シミュレーション結果

1)　THW と 1/TTC の関係

先行車両減速場面を対象とした ACC による追従走行シミュレーションの結果をもとに、先行車両が減速し始めてから 1/TTC が最大となるまでの THW と 1/TTC の変化の関係を図 4-10 に示す。図 4-10 には二つの曲線があり、上側の曲線が車間時間設定 1.3[sec]（ACC(S)）の場合、下側の曲線が車間時間設定 2.3[sec]（ACC(L)）の場合の結果である。白色、灰色、黒色のプロットはそれぞれ、先行車両の減速度が 0.1g、0.2g、0.3g である場面の結果を示している。図 4-10 から、先行車両の減速度が大きくなるにつれて、1/TTC は増加し、THW はわずかに減少することがわかる。ACC(S)による追従走行中に先行車両が 0.3g の減速を行った場合、TTC は 3.8[sec]まで減少した。

また、実車実験で計測した TTC_{min} となる時の THW と 1/TTC の関係を図 4-10 にプロットした。それぞれ赤色のプロットは ACC(S)、青色のプロットは ACC(L)の実車実験から計測した結果を示している。赤色のプロットは 1/TTC の横軸に対して 0.12 [1/sec]から 0.19[1/sec]まで広がりがあった。また、青色のプロットは 1/TTC の横軸に対して 0.08 [1/sec]から 0.12 [1/sec]まで広がりがあった。実車実験から計測したデータの横軸に広がりがあった理由は各減速シーンにおける先行車両の減速度の変化が表れているためである。際、ACC(S)のときの先行車の減速度は、0.14 から 0.24 g [m/sec2]であった。ACC(L)のときの先行車の減速度は 0.15 から 0.28 g [m/sec2]であった。実車実験で計測された THW と 1/TTC の関係は ACC による追従走行シミュレーションで得られたものとほぼ一致していたと考えられる。

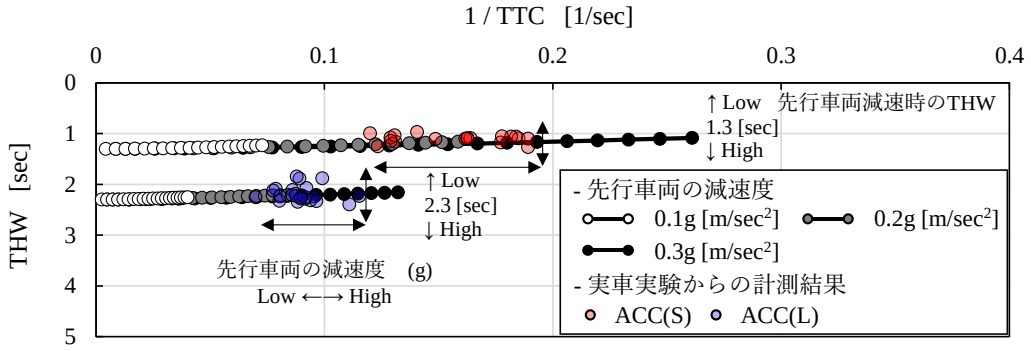


図 4-10　先行車両の減速開始から 1/ TTC_{min} となるまでの THW と 1/TTC の関係（実験結果 vs.シミュレーション結果）

2) ACC の車間時間設定を考慮した THW-1/TTC の予測

実車走行実験より、先行車両が減速した際の TTC の最小値を基にドライバの RF を推定するモデルが得られた（式 4-6)。シミュレーションにより予測した $1/TTC_{min}$ を式 4-6 に入力することで RF を推定することができると考えられる。$1/TTC_{min}$ は ACC の車間時間別・先行車両の減速別で計算可能なため、それに対応した RF を推定することができる。車間時間設定や先行車両の減速が RF に与える影響を明らかにし、ACC への介入が発生しないような ACC の設定を検討するための予測である。

図 4-11 は ACC を用いた走行において、ACC の車間時間設定が 1.3、1.8、2.3、2.8、3.3、3.8、4.3[sec]のときに先行車両が減速した場合の追従走行シミュレーションの結果を示している。白色、灰色、黒色のプロットはそれぞれ先行車両の減速度が 0.1g、0.2g、0.3g の場合の結果である。先行車が減速し始めてから 1/TTC が最大になるまでの THW と 1/TTC の変化の関係を示した。

先行車の減速度が 0.3g[m/sec2]、ACC の車間時間設定が 1.3[sec]のとき、1/TTC の最大値は 0.26[1/sec]、THW は 1.08[sec]となった。先行車の減速度が 0.3g[m/sec2]、ACC の車間時間設定が 4.3[sec]のとき、1/TTC の最大値は 0.07[1/sec]、THW は 4.28[sec]であった。ACC のタイムギャップ設定が長いほど、1/TTC の最大値は小さくなった。

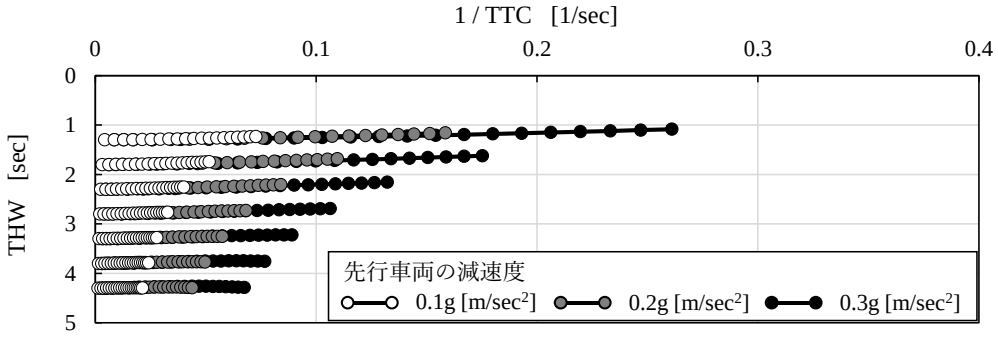


図 4-11　7 つの ACC の車間時間設定と 3 つの先行車両の減速度に応じた THW と 1/TTC の関係に関するシミュレーション結果（時定数 0.8[sec]）

4.5　先行車両減速場面での ACC 走行によるドライバの危険感の推定

4.5.1　各車間時間設定における RF の推定

図 4-12 での ACC による追従走行シミュレーションの結果に対応するドライバの RF の推定を試みた。実車走行実験では、先行車両減速時の追突に対するドライバの主観的な危険感を RF として計測した。実車走行実験より、先行車両が減速した際の TTC の最小値を基にドライバの RF を推定するモデルが得られた。ACC による追従走行シミュレーションで推定した $1/TTC_{min}$ を式 4-6 に入力することで、ドライバの RF を推定することができた。図 4-12 に ACC の車間時間設定ごとの RF 推定値を示す。横軸は ACC の車間時間設定値、縦軸は推定した RF の値である。白色、灰色、黒色のプロットはそれぞれ先行車両の減速度が 0.1g、0.2g、0.3g の場合の結果である。

先行車両の減速度が大きくなるにつれ RF の値も大きくなった。また、ACC の車間時間設定が低くなるほど RF の値は大きくなった。先行車両の減速度 0.1g [m/sec^2]であるとき、RF の値は 1.6（車間時間設定：1.3[sec]）から 0.5（車間時間設定：4.3[sec]）の値となった。先行車両の減速度 0.2g [m/sec^2]であるとき、RF の値は 3.5（車間時間設定：1.3[sec]）から 1.0（車間時間設定：4.3[sec]）の値となった。先行車両の減速度 0.3g [m/sec^2]であるとき、RF の値は 5.7（車間時間設定：1.3[sec]）から 1.5（車間時間設定：4.3[sec]）の値となった。

先行車の減速度が 0.1g[m/sec^2]のとき、ACC の車間時間設定 1.3[sec]を使用した際の RF と ACC の車間時間設定 4.3[sec]を使用した際の RF の差は 0.9 であった。一方で、先行車の減速度が 0.3g[m/sec^2]のとき、その差は 4.2 であった。短い ACC の車間時間設定を使用するにつれて、先行車両減速が RF に与える影響が増加した。図 4-11 において、ACC の車間時間設定を短くし、先行車両の減速度を大きくすると、1/TTC の値が大きくなるためである。これらの結果から、ACC による追従走行シミュレーションに RF のモデルを組み込むことで、ACC の車間時間設定を仮定した際の先行車両減速による RF の変化を示すことができると考えられる。

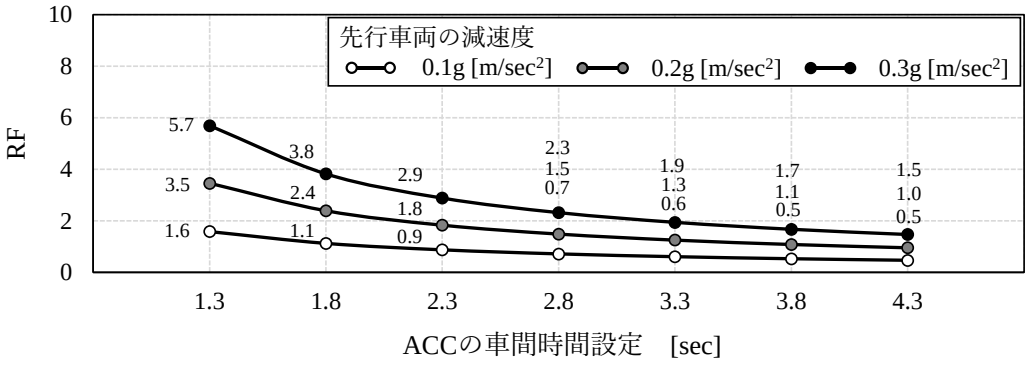


図 4-12　各 ACC の車間時間設定を使用した際の先行車両減速による RF の推定結果

4.5.2 RF 増大に起因した ACC への介入を回避する車間時間設定の検討

走行実験の先行車両減速における ACC への介入が伴った際のドライバの RF の平均値と図 4-12 を対応させる。RF 増大に起因したドライバによる ACC への介入を回避可能となる車間時間設定について検討する。

実験時、ドライバが ACC に介入したケースは、13 件あった。そのうち 5 件は、RF が 1 または 2 であり、RF の増大に起因した ACC への介入とは言えないと考え、残りの 8 件の平均値を求めた。走行実験から計測した ACC への介入が伴った際のドライバの RF の平均値は、5.4（n=8, std.=1.4）であり、そのすべてが ACC(S)を使用した際のものであった。ドライバが ACC に介入した際の RF の平均値から標準偏差を引いた値を RF_{OR} とする(RF_{OR}：5.4－1.4＝4.0)。RF_{OR} を超えるとき、ドライバが ACC に介入すると仮定した。図 4-12 から、RF_{OR} を超えないような ACC の車間時間設定を検討する。

RF_{OR} の 4.0 を超えるような図 4-12 の RF は、先行車両の減速度が 0.3g[m/sec^2]で車間時間設定 1.3[sec]のときの 5.7 であった。そのほかの RF は 4.0 を超えることはなかった。車間時間設定 1.3 秒は、実験で使用した ACC(S)と同等であり、実際に ACC(S)を使用した際に ACC への介入が発生していることから、図 4-12 の RF の予測は妥当な数値であると考えられる。

ACC(M)に相当する車間時間設定 1.8[sec]、ACC(L)に相当する車間時間設定 2.3[sec]では、それらの RF が最大 3.8、2.9 となっており、RF_{OR} の 4.0 まで余裕がある。夏期路面の走行を想定した場合、市販されている ACC(M)、ACC(L)の車間時間は、ドライバの危険感を考えたときに妥当なものであると考えられる。ACC(S)で先行車両の減速度が大きい場合の RF は 5.7 となり、RF_{OR} の 4.0 を上回る。先行車両と接近する際、ACC(S)の利用は、RF に起因した ACC への介入となる可能性が高い。

乾燥路面で ACC(S)をドライバが使用している際、道路側から、工事などによる車線規制区間の開始地点・高速道路上の事故地点・故障車の地点など、イレギュラーな車両の錯綜が起きることが想定される事象に関する情報提供を行い、情報を受け取った車両は、事象の手前で ACC(M)あるいは ACC(L)へと自動で変更し、その意図をドライバに伝えることで、ドライバの危険感を高めずに走行が可能になると考えられる。

4.6 まとめ

本章では、先行車両の減速と ACC の車間時間設定が追従車両を運転するドライバの主観的な危険感に与える影響について明らかにすることを目的とした。ACC を用いて高速道路を走行中に先行車両と接近する際の先行車両との追突に対するドライバの主観的危険感（以降、RF）を実車走行実験で計測した。実車走行実験で計測した RF は TTC 最小値の逆数からモデル化した。また、先行車両減速場面を対象とした ACC による追従走行を実車走行実験の結果を用いてシミュレーションした。シミュレーションによって求めた TTC 最小値を RF のモデルに入力することで、先行車両の減速度・ACC の車間時間設定別に RF を推定した。RF の推定結果から、RF に起因したドライバの ACC への介入が回避可能となる ACC の車間時間設定について検討した。以下のような結果が得られた。

1) ACC を用いて高速道路を走行しているドライバの RF を実車で計測した。ACC を使用した場合の RF はドライバ運転よりも大きくなった。また、実車実験で計測した $1/TTC_{min}$ の値を用いて、 RF を運転タイプ別（ドライバ運転、ACC 走行）にモデル化した。その結果、$1/TTC_{min}$ の値は RF に有意な影響を与えることが確認できた。
2) 先行車両減速場面における ACC の時定数を考慮して、ACC による追従走行シミュレーションモデルを検討した。その結果、時定数が 0.8[sec]の場合で ACC による追従車両の挙動を最もよく再現できるシミュレーションモデルとなった。シミュレーションによって求めた TTC_{min} と実車実験によって計測した TTC_{min} は、R^2 値が 0.95 であり、同様の数値となっていた。TTC_{min} はシミュレーションによって再現可能であると考えられた。
3) RF のモデルを用いて、ACC による追従走行シミュレーションの結果に対応するドライバの RF の推定を試みた。車間時間設定・先行車両の減速度別に RF を推定した。ACC の車間時間設定を短くし、先行車の減速度を大きくすると、TTC の減少を起因としてドライバの RF が高まった。
4) 走行実験でドライバが ACC に介入した際のドライバの RF の平均値（以降、RF_{OR}）を RF の推定結果に対応させた。推定した RF が RF_{OR} を超える状況は、先行車両の減速度が 0.3g[m/sec^2]で ACC の車間時間設定が 1.3[sec]のときであった。走行実験でドライバが ACC に介入した状況と類似していることから、シミュレーションによる RF の予測は妥当な数値であると考えられた。
5) ACC(L)に相当する ACC の車間時間設定 2.3[sec]では、推定した RF が最大 2.9 となっており、RF_{OR} の 4.0 まで余裕があった。夏期路面の走行を想定した場合、ACC(L)の車間時間設定は、RF に起因したドライバの ACC への介入を回避可能な車間時間設定として妥当なものであると考えられた。

RF を考慮することで、ドライバが介入しない ACC の快適かつ安全な使用方法を検討できると考えられる。例えば、乾燥路面で ACC(S)をドライバが使用している際、道路側から、工事などによる車線規制区間の開始地点・高速道路上の事故地点・故障車の地点など、イ

レギュラーな車両の錯綜が起きることが想定される事象に関する情報提供を行い、情報を受け取った車両は、事象の手前でACC(L)へと自動で変更し、その意図をドライバに伝えることで、ドライバの危険感を増大させずに走行が可能になると考えられる。将来的に路車間通信や車車間通信などのデータから自車の ACC 挙動を制御するとき、RF を考慮することでドライバの危険感を起因としたACCへの介入を防ぐことができると考えられる。

本章では、今回使用した車両が搭載しているACCの車間時間設定内で、イレギュラーな追従走行に対応可能であることを示した（乾燥路面）。一方で、冬期道路環境では、RF の高まりにより、必要なACCの車間時間・速度設定などは乾燥路面よりもシビアになる。本章の方法論を応用することは、冬期道路環境でのACCの車間時間・速度設定を絞り込むことに有用であると考えられる。

第 5 章　危険感に基づいた冬期道路環境への ACC の設定に関する適応条件

5.1　はじめに

路面凍結や視界不良が原因で、冬期道路環境での運転を困難に感じるドライバが多い。積雪寒冷地ではそのような運転条件にもかかわらず仕事及びプライベートで長距離移動を強いられる場面がある。冬期道路環境に Adaptive Cruise Control（以降、ACC）などのような運転支援システムが利用できれば、運転負荷の軽減、走行の安全性向上などが期待できる（J. C. de Winter ら, 2014 [28]；J. D. Lee ら, 2006 [77]；花守ら, 2021 [51]）。

現在の自動運転の使用限界は気象状況や路面状況による機能制限が大きな要因である。国土交通省の自動運行装置に関する保安基準案（2019 年 12 月）では「走行環境基準を満たしていない場合又は自動運行装置が正常に作動しない恐れがある場合」に自動運転の使用を制限する旨が記述されている。一方で、運転疲労軽減や走行の安全性向上などのメリットを考えたとき、冬期道路環境に適応した自動運転に対する期待は大きい。

しかし、現在市販されている ACC の多くは滑りやすい路面状況へ適応するように設計されていない。自動車の操作マニュアルには冬期道路環境での ACC の使用を推奨しないことが記述されているケースもある。ACC は運転の自動化を実現するための重要な技術であり、冬期道路環境への ACC の適応条件を知ることは快適・安全な自動運転を冬期道路環境に導入するための足掛かりとなる。

冬期路面での ACC 走行を可能とするために、現在までいくつかの報告がされている。萩原ら(2019)はドライビングシミュレータ（以降、DS）を用いて ACC 使用中のドライバが前方の低 μ 路に起因するリスクを事前に回避するための情報提供について検討を試みた [66]。前方が低 μ 路であることをドライバに伝えることで事前の減速行動をドライバが選択し、危険な事象の回避が早まることを明らかにした。加藤ら(2019)は冬期の実道において ACC を使用した実車実験を行った [67]。ドライバによる ACC への介入の発生条件について、路面の滑り抵抗値と道路線形に着目した。道路線形・路面状態が OR 発生に影響を与えることを明らかにした。Koglbauer ら（2017）は DS を用いて、雪道でのドライバの ACC 使用状況を調査した [68]。雪道における ACC の THW 設定について、短い THW (Time Headway)の設定（1[sec]）に比べ、長い THW の設定（1.8[sec]）を適切と考えるドライバが多いことを明らかにした。和田ら（2021）は ACC 走行しているドライバの先行車両への追突に関する主観的リスク認知レベルを実際の高速道路で計測した。圧雪路面での走行時、ACC の車間時間設定を長くすることで先行車両への追突に関する危険感がドライバ運転と同等となる可能性を報告している [86]。

第 4 章でも挙げた通り、現在市販されている車両が搭載している ACC は先行車両が急減速する場面のようなイレギュラーな追従状況には対応していない（伊藤, 2008 [35]；H. U. Ahmed ら, 2021 [36]）。また、現在の ACC は冬期路面に適応しておらず、冬期路面でのイレギュラーな追従状況に対しどのような ACC の設定（車間時間、速度）が必要になるか明ら

かになっていない。冬期路面で快適で安全に ACC を利用するために、本章では、圧雪路面における ACC 走行中の先行車両減速と車間時間・速度設定が追突に対するドライバの危険感（以降、RF）に与える影響を明らかにする。RF 増大に起因した ACC への介入が発生しないような冬期道路環境への ACC の設定に関する適応条件について検討する。

本章では以下を実施する。

1) 圧雪路面で先行車両が減速した時の RF を推定するモデルを 8 名の実験参加者による実車走行実験の結果に基づいて構築する。
2) 実車走行実験の結果から、先行車両減速場面を対象とした ACC による追従走行シミュレーションのパラメータを決定する。
3) いくつかの追従条件下で、先行車両が減速した時の RF を推定する。ACC による追従走行シミュレーションで推定した最小 TTC の値を RF のモデルに入力することで RF を推定する。
4) RF 増大に起因した ACC への介入が発生しないような冬期道路環境への ACC の設定に関する適応条件について検討する。

5.2　実車実験の方法

5.2.1　実車実験の目的

圧雪路面での ACC による追従走行中の先行車両減速と ACC の車間時間設定が RF に与える影響を明らかにする。先行車両の減速度、ACC の車間時間設定、走行速度、路面状態を変更した際の ACC による追従走行実験を実施し、RF を計測する。先行車両減速時の TTC 最小値を用いて RF のモデルを路面別、走行速度別に構築する。

5.2.2　実験参加者

8 名の運転に慣れたドライバが実験に参加した。すべての実験参加者は年間走行距離 3,000[km]以上、積雪時・非積雪時共に週数回以上運転していた。実験参加者の平均年齢は 50.6 歳(Std.=10.5)だった。性別は全員男性であった。平均運転歴は 31.3 年(Std.=10.9)であった。実験参加者は全員 ACC の使用経験があり、ACC の使い方やシステム限界について理解していた。実験説明後に実験参加者全員が同意書にサインをした。北海道大学工学系ヒトを対象とする研究倫理審査委員会に実験内容の審査を依頼し，実験内容・安全性・倫理などについて実験実施前に承認を受けた。

5.2.3　実車実験の日時と走行コース

ACC による追従走行実験を 2021 年 1 月 19 日から 1 月 21 日、1 月 23 日の 4 日間、午前 9 時から午後 4 時までの日中に行った。4 日間の天候はほぼ快晴であった。ACC による追従走行実験は北海道苫小牧市にある寒地土木研究所の苫小牧寒地試験道路をテストコースとして利用した。苫小牧寒地試験道路は片側一車線、直線区間 1.2[㎞]、全長 2.7[km]の周回路である。設計速度は北側の直線が 80[km/h]、南側の直線が 120[km/h]である。北側 1.2[km]の直線区間に乾燥路面、南側 0.8[km]の直線区間に圧雪路面をそれぞれ用意した。本実験の走行コースを図 5-1 に示す。

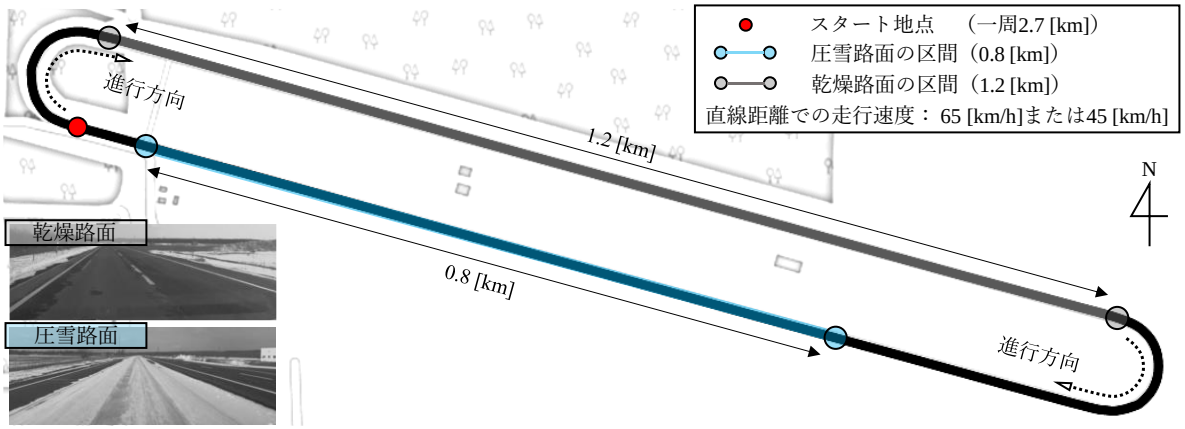


図 5-1　実験コース

5.2.4　実験条件

5.2.4.1　3 種類の ACC の車間時間設定

先行車両と ACC を搭載した追従車両の 2 台を実験車両として使用した。実験参加者は追従車両を運転した。追従車両の ACC の Time-Gap Settings は 1.3 秒、1.8 秒、2.3 秒の 3 種類であった（以降、ACC(S)、ACC(M)、ACC(L)と表記）。

5.2.4.2　2 種類の先行車両による減速

先行車両は減速度 0.1g、減速度 0.3g (以降、減速度-low、減速度-high と表記)を目安に直線区間において減速した。先行車両の減速点は特に定めず、各直線で 1 箇所とした。

5.2.4.3　2 種類の走行速度

先行車両と追従車両は直線区間を約 65[km/h]と 45[km/h]の 2 種類の速度(以降、走行速度-low、走行速度-high と表記)で走行した。

5.2.5　計測

5.2.5.1　RF の計測

第 4 章と同様に、先行車両の減速ごとに、先行車両との追突に対する危険感をドライバにヒアリングした。ドライバは先行車両との追突に対する危険感を 10 段階（危険感小 1←→大 10）で口頭によって減速直後に回答した(以降、RF と表記)。解析時に 1～10 点の点数を主観評価値に付与した。

5.2.5.2　走行速度及び車間距離の計測

Real Time Kinematic - Global Navigation Satellite System (以降、RTK-GNSS)によって先行車両と追従車両の車間距離と走行速度を連続的に記録した。この際、RTK-GNSS のレシーバーとして The RTK W-band GNSS receiver (DG-PRO1RWS, BizStation 社)を用いた。先行車両と追従車両には同一の RTK-GNSS レシーバーを搭載した。RTK-GNSS は、既知点から補正された観測情報を移動局に送信することで、移動局の位置を決定する高精度なリアルタイム計測手法である。RTK で受信しているときの精度は直線方向に対し 0.03[m]である。2 点の RTK-GNSS レシーバー設置個所の相対距離の算出にはヒュベニの式を用いた（式 4-1 から式 4-3）。実験車両の延長と 2 点の RTK-GNSS レシーバー設置個所の相対距離から先行車両と追従車両の車間距離を求めた（式 4-4）。システムのサンプリング及び出力レートは 8[Hz]であった。

5.2.6　実験設計

1 名の実験参加者に対して計 24 回の減速状況を与えた(12 周/参加者)。走行速度 2 タイプ(走行速度-low, 走行速度-high)、先行車両の減速度 2 タイプ (減速度-low, 減速度-high)、ACC の車間時間設定 3 タイプ (ACC(S), ACC(M), ACC(L))の 2×2×3 を組み合わせ、12 タイプの先行車両減速を乾燥路面と圧雪路面各々で実施した。12 タイプの先行車両減速は実験参加者ごとランダムな順で実施した。直線区間で使用する ACC の設定速度と車間時間設定は実験担当者から実験参加者に口頭で指示した。6 回の先行車両減速（テストコースを 3 周）ごとに 10 分間の休憩をはさんだ。

5.2.7　実験手順

走行開始時に、実験担当者は実験参加者に対して実験概要、スケジュール、各減速後に行う主観評価タスクを 30 分かけて説明した。説明後に実験参加者は同意書にサインした。実験の主な教示内容は以下である。

1) 直線区間で先行車両が減速することをあらかじめ伝えた。危険と感じたときは迷わずブレーキを踏み ACC を解除してもよい。
2) 先行車両減速時の危険感について、先行車両の減速ごとに 1 を危険感小 10 を危険感大とし、10 段階で口頭によって回答してもらうことを説明した。この際、危険感は先行車両との「追突」への危険感であることを伝えた。

実験開始前に練習走行を行った。ACC による追従走行でテストコースを 2 周した。1 周目は ACC の設定速度を 70[km/h]、2 周目は ACC の設定速度を 50[km/h]とした。乾燥路面では ACC(L)、圧雪路面では ACC(S)を使用した。また、1 周目 2 周目共に乾燥路面では減速度-low、圧雪路面では減速度-high で先行車両は減速した。

5.3 実車走行実験の結果

5.3.1 データ取得結果

実験設計では、乾燥路面で 96 回、圧雪路面で 96 回の計 192 回の先行車両減速を想定した。機材の不調により計測ができなかった減速状況が乾燥路面で 1 回（ACC(S)における走行速度-high での先行車両の減速度-low)、圧雪路面で 1 回（ACC(L)における走行速度-high での先行車両の減速度-low）あった。そのため先行車両減速時のデータ数は乾燥路面と圧雪路面共に 95 回、計 190 回となった。乾燥路面の 95 回の減速状況のうち、10 回の減速でドライバが ACC によるブレーキを中断し、自身で減速することを選択した。そのような状況は圧雪路面では 18 回あった。

5.3.2 RF の計測結果

図 5-2 は乾燥路面で先行車両が減速した際のドライバの主観的な危険感の平均値を示している。図 5-2(a)は先行車両の減速度が low、図 5-2(b)は先行車両の減速度が high の結果である。図 5-3 は圧雪路面で先行車両が減速した際のドライバの主観的な危険感の平均値を示している。図 5-3(a)は先行車両の減速度が low、図 5-3(b)は先行車両の減速度が high の結果である。

先行車両の減速度(low, high)、走行速度(low, high)、ACC の車間時間設定(S, M, L)の 3 要因を独立変数とし、RF を従属変数とし、乾燥路面と圧雪路面に分けて分散分析（対応あり）を行った。乾燥路面と圧雪路面の各々において、要因の組み合わせによる交互作用は有意とならなかった。乾燥路面と圧雪路面の各々において、先行車両の減速度(乾燥: $f=46.9$, $p>0.001$, 圧雪: $f=35.2$, $p>0.001$)と ACC の車間時間設定 (乾燥: $f=21.6$, $p>0.001$, 圧雪: $f=40.6$, $p>0.001$)が RF に対して有意な影響を与える結果となった。実際に図 5-2 と図 5-3 に示す通り、RF の平均値は乾燥・圧雪路面共に ACC(S)>ACC(M)>ACC(L)、減速度-high>減速度-low となった。

乾燥路面で先行車両の減速度が low のとき、ドライバの主観的な危険感の平均値は ACC(S)では 3.9(Std.=1.7,n=16)、ACC(M)では 2.3(Std.=0.9,n=16)、ACC(L)では 1.7(Std.=1.0,n=16)となった（図 5-2(a)）。乾燥路面で先行車両の減速度が high のとき、ドライバの主観的な危険感の平均値は ACC(S)では 6.0(Std.=1.8,n=16)、ACC(M)では 4.8(Std.=1.8,n=16)、ACC(L)では 3.3(Std.=1.3,n=16)となった（図 5-2(b)）。

圧雪路面で先行車両の減速度が low のとき、ドライバの主観的な危険感の平均値は ACC(S)では 6.1(Std.=1.9,n=16)、ACC(M)では 3.2(Std.=1.3,n=16)、ACC(L)では 2.6(Std.=1.4,n=16)となった（図 5-3(a)）。圧雪路面で先行車両の減速度が high のとき、ドライバの主観的な危険感の平均値は ACC(S)では 7.9(Std.=1.6,n=16)、ACC(M)では 5.6(Std.=2.0,n=16)、ACC(L)では 4.3(Std.=1.7,n=16)となった（図 5-3(b)）。

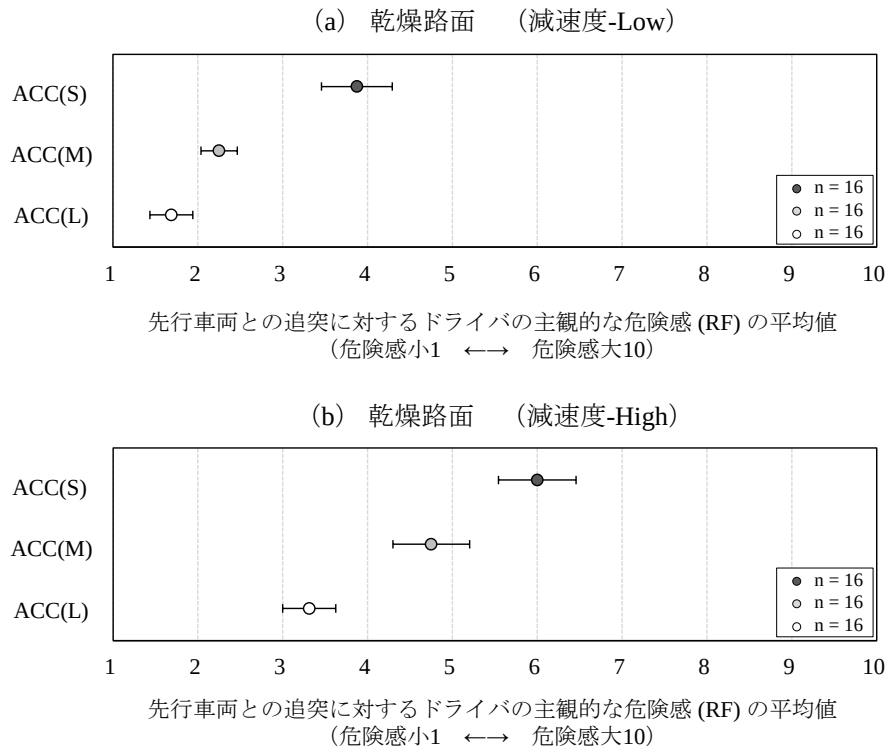


図 5-2 各車間時間設定におけるドライバの RF の平均値（乾燥路面）

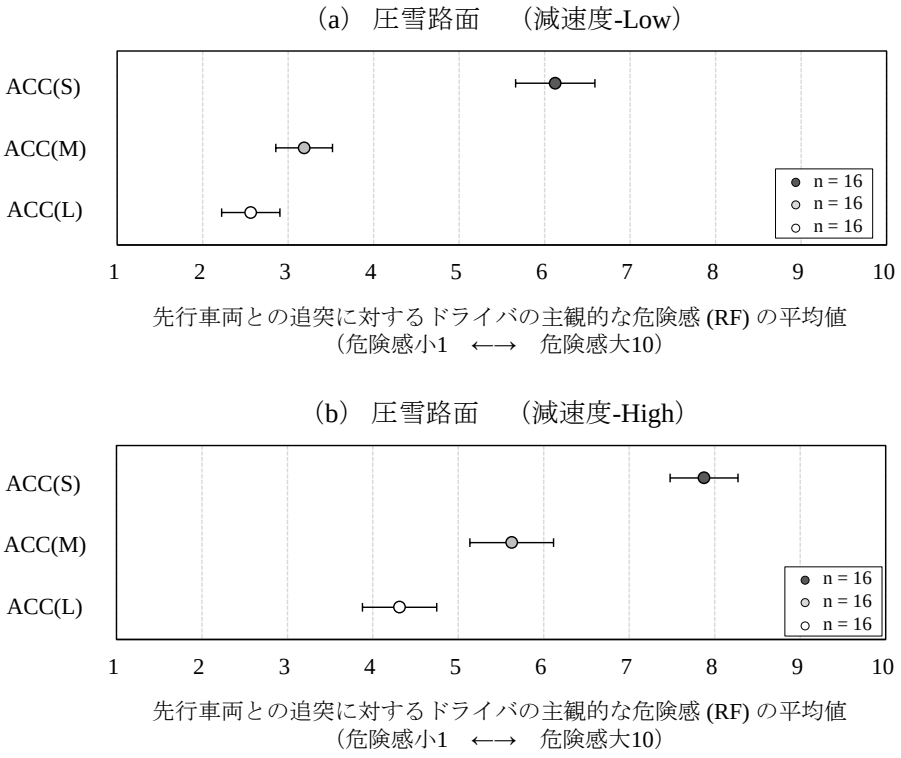


図 5-3 各車間時間設定におけるドライバの RF の平均値（圧雪路面）

5.3.3 $1/TTC_{min}$ と RF の関係

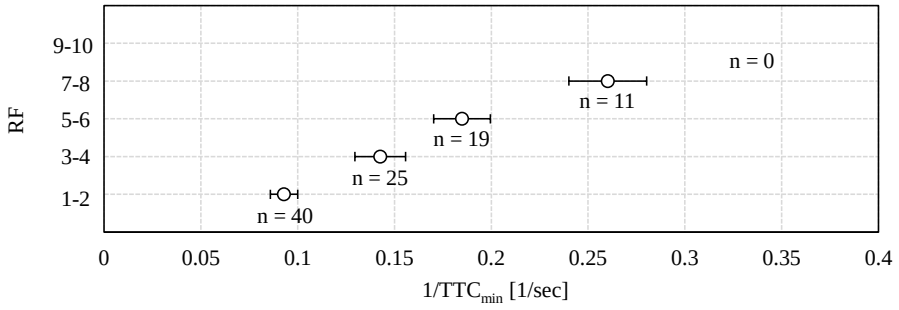
図 5-4 は先行車両減速時の $1/TTC_{min}$ と RF との関係を示したものである。図 5-4(a)は乾燥路面、図 5-4 (b)は圧雪路面での走行の結果である。縦軸はデータ数の関係から、RF の値を 10 段階から 5 段階とし、図 5-4 に示した。横軸は各 RF における TTC_{min} の逆数[1/sec]の平均値を示した。

乾燥路面と圧雪路面共に、$1/TTC_{min}$ の値が大きくなるほど RF の値も大きくなった。乾燥路面よりも圧雪路面の方が $1/TTC_{min}$ の増加に対する RF の傾きが急であった。圧雪路面では $1/TTC_{min}$ の大きさが同程度であっても乾燥路面に比べ RF が増大することが分かる。

乾燥路面では(図 5-4(a))、RF の値が「1-2」の時、$1/TTC_{min}$ の平均値は 0.09(n=40, std.=0.04)だった。RF の値が「3-4」の時、$1/TTC_{min}$ の平均値は 0.14(n=25, std.=0.07)だった。RF の値が「5-6」の時、$1/TTC_{min}$ の平均値は 0.18(n=19, std.=0.06)だった。RF の値が「7-8」の時、$1/TTC_{min}$ の平均値は 0.26(n=11, std.=0.07)だった。乾燥路面では 9 以上の RF をドライバは回答しなかった。

圧雪路面では(図 5-4(b))、RF の値が「1-2」の時、$1/TTC_{min}$ の平均値は 0.10(n=19, std.=0.05)だった。RF の値が「3-4」の時、$1/TTC_{min}$ の平均値は 0.11(n=23, std.=0.04)だった。RF の値が「5-6」の時、$1/TTC_{min}$ の平均値は 0.14(n=26, std.=0.07)だった。RF の値が「7-8」の時、$1/TTC_{min}$ の平均値は 0.18(n=20, std.=0.07)だった。RF の値が「9-10」の時、$1/TTC_{min}$ の平均値は 0.25(n=7, std.=0.08)だった。

(a) 乾燥路面



(b) 圧雪路面

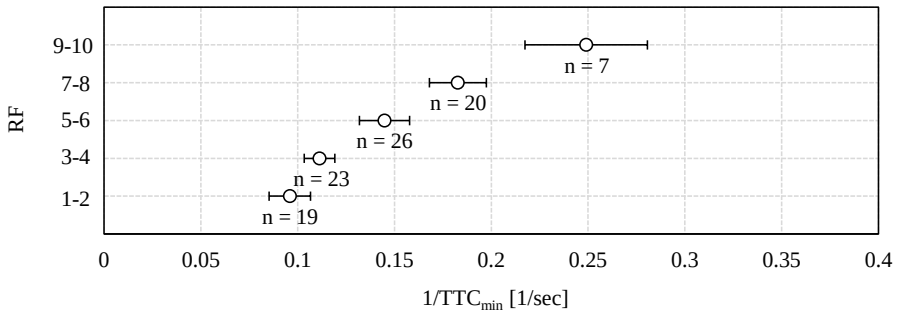


図 5-4　各路面状態における $1/TTC_{min}$ の平均値と RF の関係

5.3.4 1/TTC_{min} を指標とした RF のモデル化

第 4 章と同様の方法で走行速度別路面別にパラメータを推定した結果、すべてのケースで 1/TTC_{min} の値が RF に対し有意な影響を与えた(式 5-1〜式 5-4)。乾燥路面での ACC の走行速度-low では、パラメータ A の推定値は 22.0 であった(n=48, std.=1.3, t=16.7, p<0.001, R^2 値=0.86)。乾燥路面での ACC の走行速度-high では、パラメータ A の推定値は 25.8 であった(n=47, std.=1.5, t=17.3, p<0.001, R^2 値=0.87)。圧雪路面での ACC の走行速度-low では、パラメータ A の推定値は 28.7 であった(n=47, std.=2.2, t=16.9, p<0.001, R^2 値=0.88)。圧雪路面での ACC の走行速度-high では、パラメータ A の推定値は 36.7 であった(n=48, std.=1.6, t=18.3, p<0.001, R^2 値=0.86)。パラメータ A の値は乾燥路面よりも圧雪路面の方が大きかった。また、パラメータ A の値は走行速度が大きいほど大きくなった。

$$RF_{dry}^{v=low} = \frac{22.0}{TTC_{min.}} \tag{5-1}$$

$$RF_{dry}^{v=high} = \frac{25.3}{TTC_{min.}} \tag{5-2}$$

$$RF_{snow}^{v=low} = \frac{28.7}{TTC_{min.}} \tag{5-3}$$

$$RF_{snow}^{v=high} = \frac{36.7}{TTC_{min.}} \tag{5-4}$$

5.3.5 実車走行実験のまとめ

テストコースでの ACC を用いた実車追従走行実験から、ドライバの先行車両に対する追突への主観的危険感(RF)を計測した。

1) 乾燥路面と圧雪路面共に先行車両の減速度と ACC の車間時間設定が RF に対して有意な影響を与えていた。実際に、ACC の車間時間設定が短いとき、先行車両の減速度が大きいときに RF の値が大きくなった。
2) 乾燥路面と圧雪路面共に、1/TTC_{min} の値が大きくなるほど RF の値も大きくなった。乾燥路面よりも圧雪路面の方が 1/TTC_{min} の増加に対する RF の傾きが急であった。
3) 1/TTC_{min} を変数とし、RF を走行速度・路面状態別に示すモデルを求めた。このモデルから、1/TTC_{min} の大きさが同じ値であっても、RF 値は乾燥路面よりも圧雪路面の方が大きくなり、走行速度が大きいほど大きくなる結果となった。

5.4　先行車両減速場面を対象としたACC車両による追従走行シミュレーション

5.4.1　シミュレーション方法

追従走行の挙動については、MATLAB Simulinkを用いて第4章1節4項と同様の方法で先行車が減速したときのACCによる追従シミュレーションを行った（式4-8から式4-18）。

5.4.2　時定数の推定

5.4.2.1　時定数の推定方法

ACC車両の速度応答を式4-14から計算するために、時定数τを実車実験の先行車両減速時のACCによる追従走行結果から推定した。時定数を推定するために、時定数を与えたときのTTC_{sim}^{t}を算出し、実験から計測したTTC_{real}^{t}と比較した。

8名の実験参加者による合計取得データ数は、乾燥路面で95回、圧雪路面で95回だった。これらのデータから24回の先行車両による減速度を用いて時定数τを推定した。路面状況ごとに、各要因の合計12通りの組み合わせから1つの減速データを無作為に選んだ。実車走行実験で計測した24回の先行車両の減速度を入力として、式4-17を用いてTTC_{sim}^{t}を算出した。この時、時定数τを0.0[sec]から1.5[sec]まで0.1[sec]間隔で変化させ、先行車の減速度1入力に対して16ケースのTTC_{sim}^{t}を算出した。

実験から計測した先行車両の加減速度a_{lead}^{t}は変動があったため、式5-5のように5点移動平均で平滑化してから式4-12に使用した。式5-5による処理結果の例を図5-5に示す。

$$a_{lead}^{t} = \frac{1}{5}(a_{lead}^{t-0.250} + a_{lead}^{t-0.125} + a_{lead}^{t} + a_{lead}^{t+0.125} + a_{lead}^{t+0.250}) \tag{5-5}$$

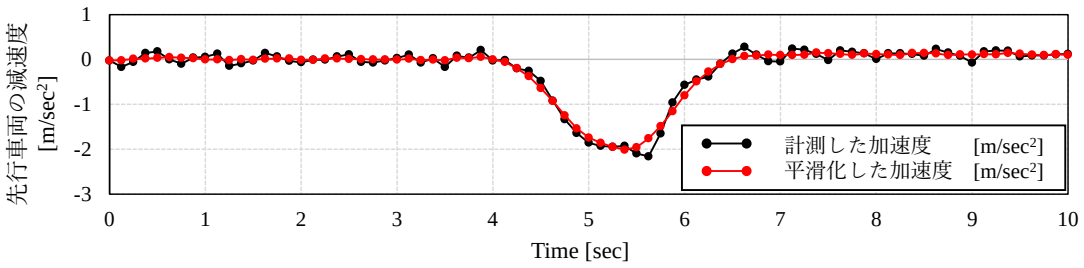


図5-5　実験から計測した先行車両の加速度の平滑化に関する例

シミュレーションは実車実験による計測と同様8[Hz]で行った。シミュレーション時間は12.5[sec]とした。シミュレーション初期値はTTC_{real}^{t}が最小となった点から6.125 [sec]手前の先行・追従車両の速度、車間距離を設定した(図5-6)。

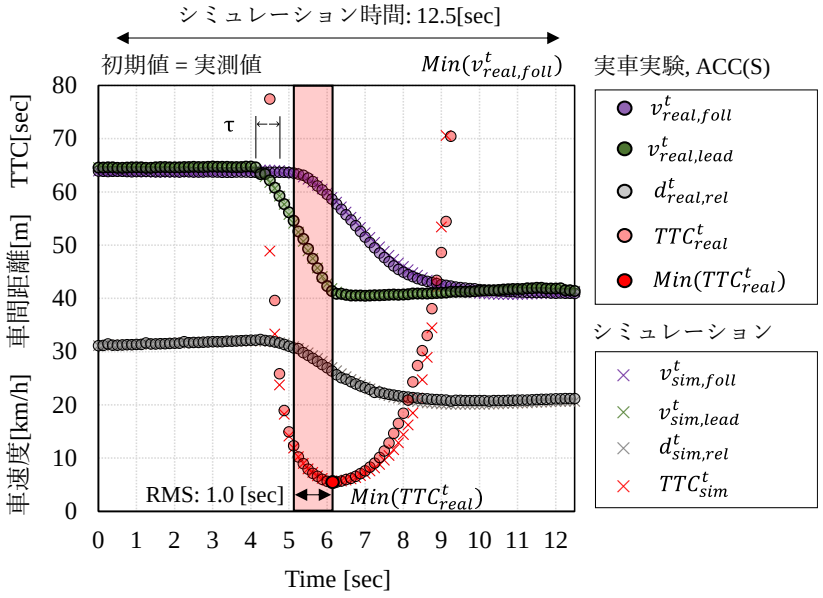


図 5-6　ACC(M)を使用した場合の時定数 τ における先行車両減速時のTTC^t_{sim}とTTC^t_{real}

5.4.2.2　時定数の推定結果

時定数 τ を仮定して算出したTTC^t_{sim}と実車走行実験で計測したTTC^t_{real}の差は RMS から評価した。RMS には、TTC^t_{real}が最小となる点から過去 8 点のデータを用いた（式 5-6）。

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{8}\sum_{t=0.125}^{1.0}(TTC^t_{real} - TTC^t_{sim})^2} \tag{5-6}$$

図 5-7 は、時定数τを 0.0[sec]から 1.5[sec]まで変化させたときの RMS の算出結果である。各時定数 τ（16 パターン）における RMS の算出には、先行車両減速に応答した ACC による減速データ 24 個（乾燥：12、圧雪：12）を用いた。各時定数 τ における RMS の値は 24 個あり、各時定数 τ における RMS の平均値を算出した。

時定数 τ =1.5[sec]の時が最も平均 RMS の値が大きくなった(τ=1.5[sec],n=24, Ave.=2.8[sec], std.=1.7[sec])。時定数を小さくしていくと、平均 RMS の値が小さくなり、τ=0.4 の時に RMS の値が最小となった(τ=0.4[sec],n= 24, Ave.=1.2[sec], std.=1.3[sec])。τ が 0 に近づくにつれ、RMS の値が大きくなった(τ=0.0[sec],n=24, Ave.=1.6[sec], std.=1.7[sec])。以上から、以降の先行車両減速場面を対象とした ACC 車両による追従走行シミュレーションでは τ=0.4[sec]を使用する。

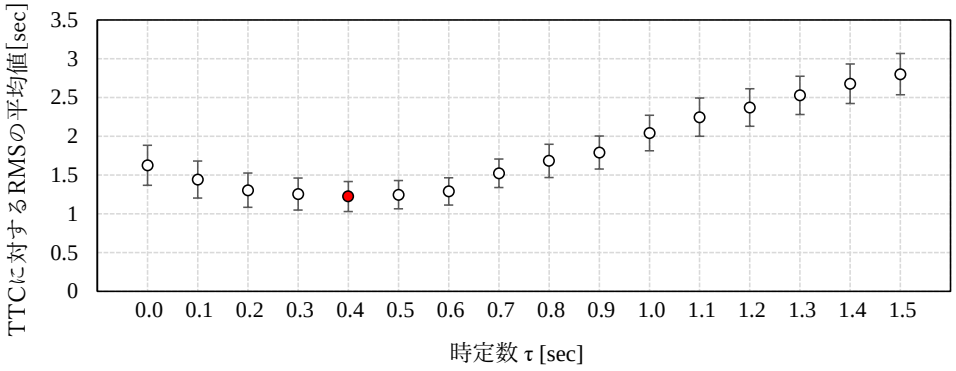


図 5-7　時定数 τ を 0.0~1.5[sec]で変化させた時の TTC に対する RMS の平均値

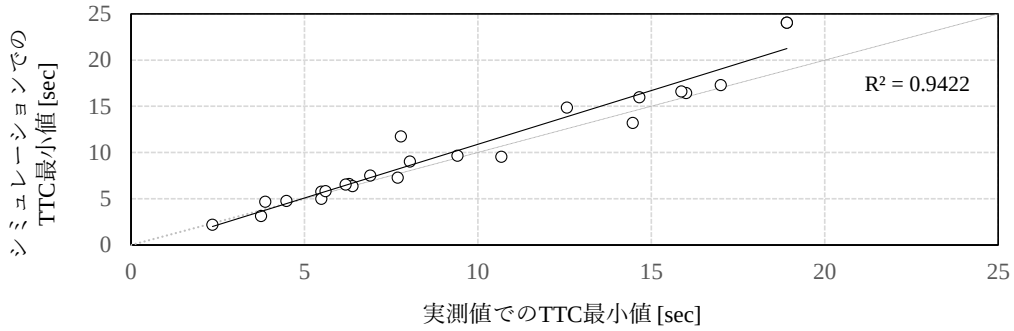


図 5-8　シミュレーションでの TTC_{min} と TTC_{min} の実測値との比較

5.4.3　TTC_{min} のシミュレーション値と実測値との比較

路面状況ごとに、各要因の合計 12 通りの組み合わせ（減速度 2×走行速度 2×車間時間設定 3）から 1 つの減速データを無作為に選んだ。実車走行実験で計測した 24 回の先行車両の減速度を入力として、式 4-17 を用いて TTC_{min} のシミュレーション値を式 4-17 から計算した。入力値である先行車両の減速は図 5-5 の様に 5 点の移動平均によって平滑化した。先行車両の減速に対する ACC の時定数は 0.4[sec]とした。各先行車両の減速に対するシミュレーションでの TTC_{min}（n=24）と実測による TTC_{min}（n=24）とを比較した。

図 5-8 は各先行車両の減速に対する TTC_{min} のシミュレーション値と TTC_{min} の実測値とを比較した結果である。1 プロットにつき 1 回分の先行車両の減速状況を示している。横軸は TTC_{min} の実測値、縦軸は TTC_{min} のシミュレーション値を示している。シミュレーションによって求めた TTC_{min} と実車実験によって計測した TTC_{min} はほぼ一致しており、R^2 値は 0.94 であった。TTC_{min} はシミュレーションによって再現可能であると考えられる。

図 4-8 と同様に、一定速度かつ ACC の設定と等しい車間時間で先行車両を追従している様な安定した追従状況で先行車両が減速したときに、シミュレーションは実測値を良く再現できると考えられる。実車実験では、先行車両と追従車両はテストコースのカーブ区間

を 20[km/h]で走行した。カーブ区間の終了地点から再び直線区間を走行する際に先行車両と追従車両は走行速度 45[km/h]・65[km/h]まで加速する。この際、先行車両の加速が ACC の加速に比べて急となっていたとき、速度差が生じ ACC の設定よりも広い車間時間設定となる追従となっていた状況があった。このような追従状況での先行車両の減速がシミュレーションによる TTC_{min} の再現に誤差を与えていたと考えられる。

5.4.4　ACC 車両による追従走行シミュレーション

5.4.4.1　シナリオとパラメータ

ACC による追従走行シミュレーションのパラメータの値を表 5-1 に示す。先行車両の減速に対する ACC による減速の時定数は τ=0.4[sec]を用いた。先行車両の減速開始手前の先行車両と追従車両の走行速度は 13.9[m/s]（50[km/h]）とした。追従車両に搭載されている ACC のシステムによる最大減加速度は、ACC システムの規格値（伊藤, 2008 [35]；H. U. Ahmed, 2021 [36]）を考慮して 0.3g[m/sec²]とした。また、先行車両の減速時間は 2[sec]間とした。追従車両の車間時間設定は 7 段階（THW_{set} = 1.3, 1.8, 2.3, 2.8, 3.3, 3.8, 4.3 [sec]）であり、先行車両の減速度は 3 段階（0.1 g, 0.2 g, 0.3 g [m/sec²]）とした。シナリオの総数は 21 ケースとなった。図 5-9 はシミュレーション時に入力した先行車両の減速シーンを示している。

表 5-1　シミュレーションパラメータ

シミュレーションにおけるパラメータ	値
時定数: τ	0.4 [sec]
先行車両と追従車両の初期速度: $v_{lead.}^{t=0}$ and $v_{foll.}^{t=0}$	13.9 [m/sec]
ACCの設定車速: v_{set}	13.9 [m/s]
ACCが取り得る最大加速度: a_{max}	0.3g [m/sec²]
ACCが取り得る最小加速度: a_{min}	0.3g [m/sec²]
ACCの車間時間設定: THW_{set}	1.3, 1.8, 2.3, 2.8, 3.3, 3.8, 4.3 [sec]
先行車両の減速度: $a_{lead.}^{t}$	0.1g, 0.2g, 0.3g (for 2.0[sec]) [m/sec²]

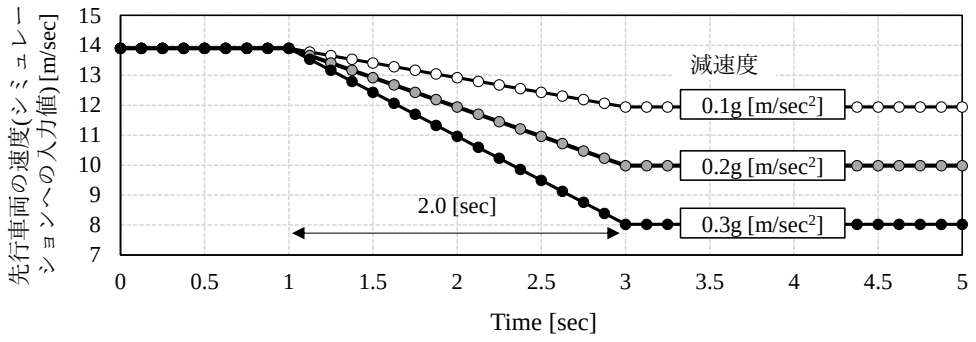


図 5-9　各減速度における先行車両の速度の変化（シミュレーションの入力値）

5.4.4.2 ACC 車両による追従シミュレーション結果

1) THW と 1/TTC の関係

先行車両減速シーンを対象とした ACC による追従走行シミュレーションの結果をもとに、先行車が減速し始めてから 1/TTC が最大になるまでの THW と 1/TTC の変化の関係を図 5-10 に示す。図 5-10 には上中下段に 3 つの曲線が描かれている。上段の曲線は ACC の車間時間設定 1.3[sec]（ACC(S)）を使用した場合の結果である。中段の曲線は ACC の車間時間設定が 1.8[sec]（ACC(M)）、下段は 2.3[sec]（ACC(L)）を使用した場合の結果である。白色、灰色、黒色のプロットは、それぞれ先行車両が 0.1g[m/sec^2]、0.2g[m/sec^2]、0.3g[m/sec^2]で減速した場合の結果である。先行車両の減速度が大きくなるにつれて、1/TTC は大きく増加し、THW はわずかに減少している結果が図 5-10 に示されている。TTC が最も小さくなった状況は ACC(S)を使用した追従状況で先行車両が 0.3g[m/sec^2]の減速を行った場合となった。この際、TTC は 3.1[sec]まで減少した。

また、実車走行実験から計測した THW と $1/TTC_{min}$ の関係についても図 5-10 に示した。図 5-10(a)は乾燥路面、図 5-10(b)は圧雪路面での実車走行実験による結果を示したものである。赤色は ACC(S)の結果、黄色は ACC(M)の結果、青色は ACC(L)の結果である。図 5-10(a)では、赤色のプロットは 0.07[1/sec]～0.41[1/sec]、黄色のプロットは 0.07[1/sec]～0.27[1/sec]、青色のプロットは 0.06[1/sec]～0.21[1/sec]の範囲を水平に分布した。図 5-10(b)では、赤色のプロットは 0.06[1/sec]～0.31[1/sec]、黄色のプロットは 0.05[1/sec]～0.24[1/sec]、青色のプロットは 0.04[1/sec]～0.15[1/sec]の範囲を水平に分布した。

実車走行実験における乾燥路面での減速度はそれぞれの車間時間設定において、ACC(S)の場合では 0.09～0.40g[m/sec^2]、ACC(M)の場合では 0.10～0.45g[m/sec^2]、ACC(L)の場合では 0.10～0.41g[m/sec^2]だった。圧雪路面での減速度はそれぞれの車間時間設定において、ACC(S)の場合では 0.12～0.31g[m/sec^2]、ACC(M)の場合では 0.13～0.40g[m/sec^2]、ACC(L)の場合では 0.10～0.40g[m/sec^2]だった。実車走行実験で測定された THW と $1/TTC_{min}$ の関係は、ACC による追従走行シミュレーションで得られたものとほぼ一致していると考えられた。

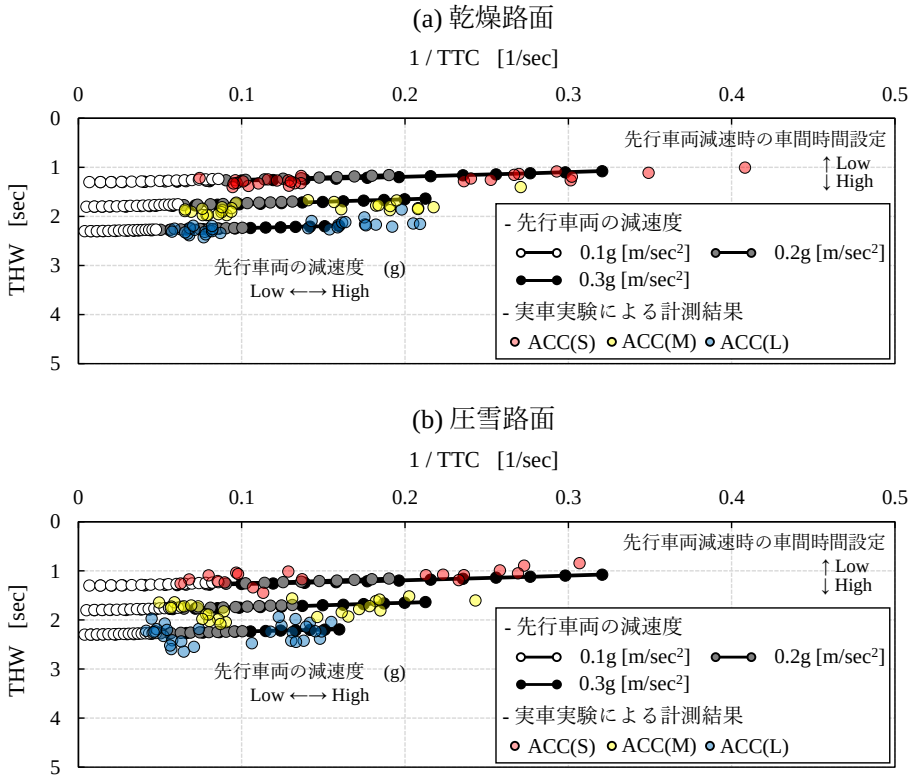


図 5-10　先行車両減速開始から 1/TTC が最大となるまでの THW と 1/TTC の関係（実車走行実験による計測値 vs.シミュレーション値）

2)　ACC の車間時間設定を考慮した THW-1/TTC の予測

図 5-11 は、ACC の車間時間設定 1.3、1.8、2.3、2.8、3.3、3.8、4.3[sec]の各々を使用した状況での先行車両減速場面を対象とした ACC による追従走行シミュレーションの結果である。白色、灰色、黒色のプロットは、先行車両が 0.1g[m/sec^2]、0.2g[m/sec^2]、0.3g[m/sec^2]で減速したときの結果である。図 5-11 は、先行車が減速し始めてから 1/TTC が最大になるまでの THW と 1/TTC の変化の関係を示している。先行車両の減速度が 0.3g[m/sec^2]、ACC の車間時間設定が 1.3[sec]のとき、1/TTC の最大値は 0.32[1/sec]、THW は 1.08[sec]であった。先行車両の減速度が 0.3g[m/sec^2]、ACC の車間時間設定が 4.3[sec]のとき、1/TTC の最大値は 0.08[1/sec]、THW は 4.28[sec]であった。1/TTC の最大値は ACC の車間時間設定の増加に伴い減少した。

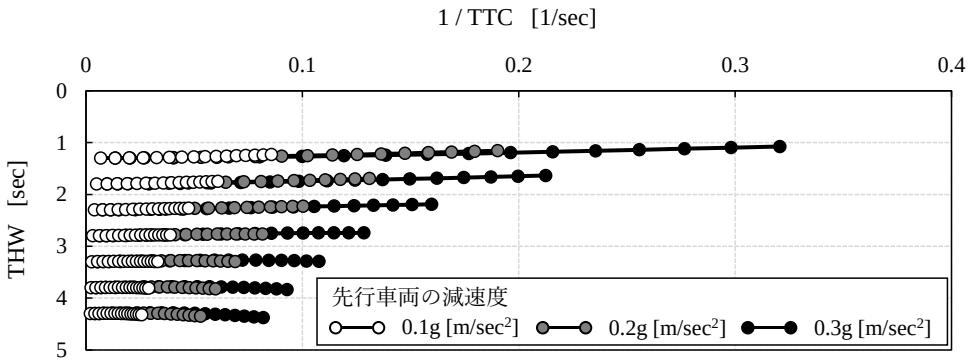


図 5-11　7 つの ACC の車間時間設定と 3 つの先行車両の減速度に応じた THW と 1/TTC の関係に関するシミュレーション結果（時定数 0.4[sec]）

5.5　乾燥路面及び圧雪路面における先行車両減速場面での ACC 走行によるドライバの危険感の推定

5.5.1　各車間時間設定・走行速度における RF の推定

図 5-11 の ACC による追従走行シミュレーションの結果に対応した走行状況において、減速している先行車両との追突に対するドライバの危険感（以降、RF）の推定を試みた。実車走行実験では、TTC 最小値を基に RF を推定する式 5-1 から式 5-4 のモデルを構築した。ACC による追従走行シミュレーションで予測した $1/TTC_{min}$ を式 5-1 から式 5-4 に入力することで、RF を推定することができる。

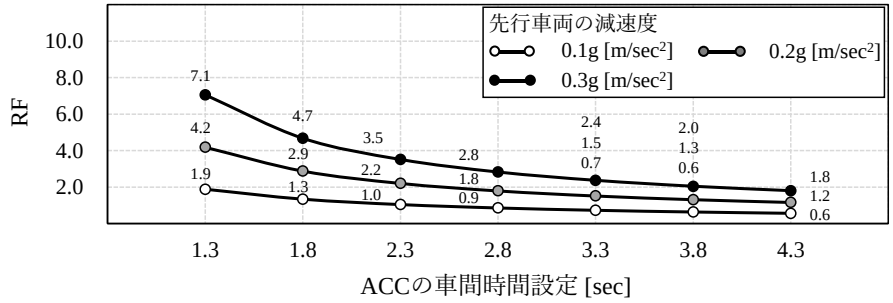
先行車両の減速度・ACC の車間時間設定ごとに推定した RF 値について、乾燥路面の結果を図 5-12 に、圧雪路面の結果を図 5-12 にそれぞれ示す。図 5-12(a)と図 5-13(a)はいずれも走行速度が 45[km/h]の場合の結果であり、図 5-12(b)と図 5-13(b)はいずれも走行速度が 65[km/h]の場合の結果である。横軸は ACC の車間時間設定、縦軸は推定した RF である。黒色のプロットは減速度 0.3g[m/sec2]の RF、灰色のプロットは減速度 0.2g[m/sec2]の RF、白色のプロットは減速度 0.1g[m/sec2]の RF を示している。

乾燥路面と圧雪路面共に、車間時間設定が小さくなるにつれて、$1/TTC_{min}$ と RF の値が大きくなった。また、先行車両の減速度が大きくなると、$1/TTC_{min}$ と RF の値が大きくなった。先行車両の減速度が大きくなると、同じ車間時間設定での RF の値が大きくなった。

乾燥路面では、走行速度の違いによる RF の値の差はほとんどなかった。圧雪路面では、式 5-3 と式 5-4 に示した $1/TTC_{min}$ に対する重みの値により、走行速度の増加に伴って RF の値が増加した。

ACC による追従走行シミュレーションと式 5-1 から式 5-4 の RF のモデルから、RF の値は路面状況、先行車の減速度、走行速度の違いによって変化することが明らかになった。

(a) 乾燥路面（走行速度: 45 [km/h]）



(b) 乾燥路面（走行速度: 65 [km/h]）

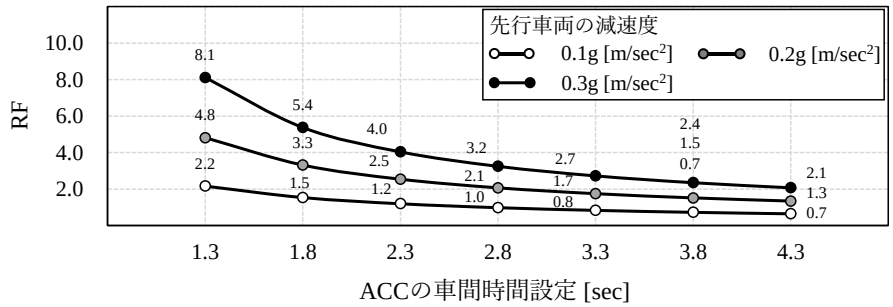
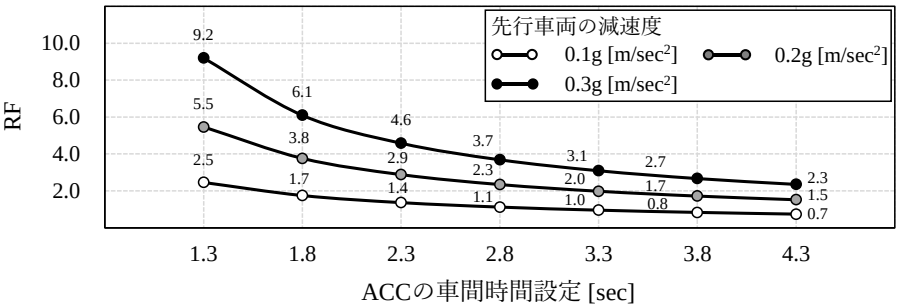


図 5-11　乾燥路面における先行車両の減速度・走行速度に応じたドライバの RF に関する推定結果

(a) 圧雪路面（走行速度: 45 [km/h]）



(b) 圧雪路面（走行速度: 65 [km/h]）

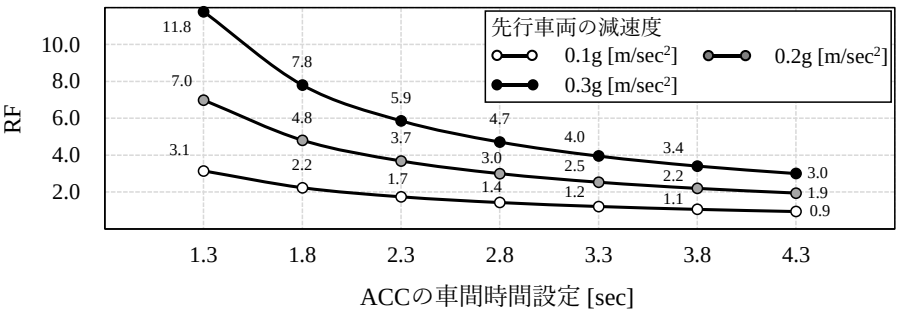


図 5-12　圧雪路面における先行車両の減速度・走行速度に応じたドライバの RF に関する推定結果

5.5.2 RF 増大に起因した ACC への介入を回避する車間時間設定の検討

走行実験の先行車両減速においてドライバによる ACC への介入が伴った際のドライバの RF の平均値と図 5-11 及び図 5-12 を対応させる。RF 増大に起因した介入を回避可能となる車間時間設定について路面別走行速度別で検討する。

実験時、速度 45[km/h]で乾燥路面を走行時、ドライバが ACC に介入したケースは、4 件あった。内訳は 2 件が ACC(S)、1 件が ACC(M)、1 件が ACC(L)だった。ACC への介入が伴った際のドライバの RF の平均値は、5.8（n=4, std.=0.5）であった。乾燥路面で走行速度が 45[km/h]（low-speed）において、ACC への介入が伴った RF の平均値と標準編差との差を以降、$RF_{OR_DRY}^{low}$とする。速度 65[km/h]で乾燥路面を走行時、ドライバが ACC に介入したケースは、6 件あった。内訳は 3 件が ACC(S)、3 件が ACC(M)だった。ACC への介入が伴った際のドライバの RF の平均値は、6.3（n=6, std.=1.0）であった。乾燥路面で走行速度が 65[km/h]（high-speed）において、ACC への介入が伴った RF の平均値と標準偏差との差を以降、$RF_{OR_DRY}^{high}$とする。

実験時、速度 45[km/h]で圧雪路面を走行時、ドライバが ACC に介入したケースは、7 件あった。内訳は 4 件が ACC(S)、3 件が ACC(M)だった。ACC への介入が伴った際のドライバの RF の平均値は、7.1（n=7, std.=1.3）であった。圧雪路面で走行速度が 45[km/h]（low-speed）において、ACC への介入が伴った RF の平均値と標準偏差との差を以降、$RF_{OR_SNOW}^{low}$とする。速度 65[km/h]で圧雪路面を走行時、ドライバが ACC に介入したケースは、12 件あった。内訳は 8 件が ACC(S)、3 件が ACC(M)、1 件が ACC(L)だった。ACC への介入が伴った際のドライバの RF の平均値は、7.7（n=12, std.=2.1）であった。圧雪路面で走行速度が 65[km/h]（high-speed）において、ACC への介入が伴った RF の平均値と標準偏差との差を以降、$RF_{OR_SNOW}^{high}$とする。

$RF_{OR_DRY}^{low}$の 5.3（5.3；平均値－σ(std.)）を超えるような図 5-11(a)の RF は、先行車両の減速度が 0.3g[m/sec^2]で車間時間設定 1.3[sec]のときの 7.1 であった。そのほかの RF は 5.3 を超えることはなかった。$RF_{OR_DRY}^{high}$の 5.3（5.3；平均値－σ(std.)）を超えるような図 5-11(b)の RF は、先行車両の減速度が 0.3g[m/sec^2]で車間時間設定 1.3[sec]のときの 8.1、先行車両の減速度が 0.3g[m/sec^2]で車間時間設定 1.8[sec]のときの 5.4 であった。そのほかの RF は 5.3 を超えることはなかった。走行速度が 65[km/h]、先行車両の減速度が 0.3g、ACC の車間時間設定が 1.3・1.8[sec]のとき、ドライバは RF 増大に起因して ACC に介入する。図 5-11 と実車実験の結果は一致していた。ACC(L)ではドライバによる ACC への介入を抑制できていると考えられる。乾燥路面では、0.4g などの大きな減速が起こらない限り、今回使用した車両に搭載されている ACC の車間時間設定内で対応可能と考えられる。

$RF_{OR_SNOW}^{low}$の 5.8（5.8；平均値－σ(std.)）を超えるような図 5-12(a)の RF は、先行車両の減速度が 0.3g[m/sec^2]で車間時間設定 1.3[sec]のときの 9.2、先行車両の減速度が 0.3g[m/sec^2]で車間時間設定 1.8[sec]のときの 6.1 であった。圧雪路面では低速走行であっても、ACC(S)や ACC(M)で、ドライバによる ACC への介入が発生してしまうことを示唆している。

$RF_{OR_SNOW}^{high}$の 5.6（5.6；平均値－σ(std.)）を超えるような図 5-12(b)の RF は、先行車両の減速度が 0.3g[m/sec^2]で車間時間設定 1.3[sec]のときの 11.8、先行車両の減速度が 0.2g[m/sec^2]で車間時間設定 1.3[sec]のときの 7.0、先行車両の減速度が 0.3g[m/sec^2]で車間時間設定 1.8[sec]のときの 7.8、先行車両の減速度が 0.3g[m/sec^2]で車間時間設定 2.3[sec]のときの 5.9 であった。圧雪路面で走行速度が速いとき、ACC(S)～ACC(L)では、ドライバによる ACC への介入が発生してしまうことを示唆している。圧雪路面での先行車両接近場面では、車間時間設定は少なくとも 2.3 秒以上が必要となる。

第 4 章で示した結果と同様、乾燥路面で ACC(S)をドライバが使用している際、道路側から、工事などによる車線規制区間の開始地点・高速道路上の事故地点・故障車の地点など、イレギュラーな車両の錯綜が起きることが想定される事象に関する情報提供を行い、情報を受け取った車両は、事象の手前で ACC(L)へと自動で変更し、その意図をドライバに伝えることで、ドライバの危険感を増大させずに走行が可能になると考えられる。

一方、圧雪路面では、走行速度が速いときに、ACC の車間時間設定を自動で変更するだけではなく速度も落とす必要がある。また、ドライバによる ACC への介入が発生してしまうため、ACC(S)～ACC(L)の車間時間設定では不十分である。圧雪路面での先行車両接近場面では、ACC の車間時間設定は少なくとも 2.3 秒以上必要となることが示唆できた。圧雪路面では、ACC(SL：車間時間 2.3 秒)、ACC(ML：車間時間 2.8 秒)、ACC(LL：車間時間 3.3 秒)のような設定が必要である。また、道路側から、イレギュラーな車両の錯綜が起きることが想定される事象や路面凍結地点に関する情報提供を行い、情報を受け取った車両は事象の手前で走行速度を落とし、ACC(ML：車間時間 2.8 秒)、ACC(LL：車間時間 3.3 秒)のような設定へと自動で変更し、その意図をドライバに伝えるといった連携が必須となると考えられる。

具体的にどの値にするかといったところまで言及はできなかったが、現状の設定では不十分であること、走行速度も落とす必要があること、道路と連携した仕組みが必須となることを示すことができた。

5.6 まとめ

圧雪路面における網羅的な走行条件を想定し、実車走行実験によるドライバの主観的危険感とシミュレーションによるTTC最小値から、ACC走行中の先行車両減速におけるドライバの危険感を求め、冬期路面におけるACCの設定（車間時間・速度）の適応条件について検討した。この中で、追突リスクを評価する指標としてTTCを用いた。

K. Vogel (2003) はTTCが小さいとき危険な状況が実際に発生していることを示し、先行車両との追突リスクの指標として使用できることを示した[58]。K. S. Christopherら (2010) は冬期道路環境では追突リスクが実際に高まることを明らかにしている[64]。A. O. Hjelkrem (2016) は圧雪路面で追従走行する状況では、乾燥路面や湿潤路面に比べてドライバの危険感が高まると報告している[65]。本研究での実車走行実験では、TTCが小さいときRFが大きく、その傾きが圧雪＞乾燥であったことから、実験参加者は冬期路面での追突リスクを正しく認知していたと考えられる。

実験結果の中で、圧雪路面としたとき、TTCが小さくなりドライバのRFは高くなった。RFが高くなるとドライバはACCに介入する場面が多くなり、利用のメリットが減少する。Hagiwaraら(2019)は路面の滑りが低いとき、カーブ区間の手前でドライバがACCをOFFにすることを報告している[87]。また、Shiraishiら(2021)は、カーブ区間で路面のすべりが低くても、ACCの速度を低く設定するとドライバは危険感を感じないことを示した[88]。Koglbauerら(2017)は冬期路面ではドライバはACCの車間時間設定が大きい方を好む傾向にあると明らかにしている[68]。ACC利用時のTTCを小さくしないための設定条件を示すことが、冬期路面におけるACC利用を実現する要件となる。

本研究では、ACCによる追従走行シミュレーションを通して、ドライバのRFを推定した。走行実験の先行車両減速において、ドライバによるACCへの介入が伴った際のドライバのRFと路面・速度・車間時間設定別に推定したRFを比較した。危険感を伴うACCへの介入を発生させないような車間時間設定について検討した。

乾燥路面では、ACC(S)・ACC(M)のとき、RF増大に起因したドライバによるACCへの介入が発生することが分かった。ACC(S)・ACC(M)をドライバが使用している際、道路側から、工事などによる車線規制区間の開始地点・高速道路上の事故地点・故障車の地点など、イレギュラーな車両の錯綜が想定される事象に関する情報提供を行い、情報を受け取った車両は、事象の手前でACC(L)へと自動で変更し、その意図をドライバに伝えることで、ドライバの危険感を増大させずに走行させる仕組みが必要なことを示唆した。

一方、圧雪路面では、走行速度が速いときに、現在の市販車両に搭載されているACC(S)～ACC(L)では、ドライバによるACCへの介入が発生することを明らかにした。圧雪路面では、ACCの車間時間設定は少なくとも2.3秒以上必要となることを示唆できた。圧雪路面では、ACC(SL：車間時間2.3秒)、ACC(ML：車間時間2.8秒)、ACC(LL：車間時間3.3秒)といった長い設定が必要である。また、道路側から、イレギュラーな車両の錯綜が想定される事象や路面凍結地点に関する情報提供を行い、情報を受け取った車両は事象の手前

で走行速度を落とし、ACC(ML：車間時間 2.8 秒)、ACC(LL：車間時間 3.3 秒)のような設定へと自動で変更し、その意図をドライバに伝えるといった連携が必須となると考えられた。

冬期の実際の道路での走行実験は危険であり、ACC による追従走行シミュレーションによって冬期道路での RF の推定に関する分析の幅を広げられることが分かった。一方、本研究における圧雪路面での走行実験では、先行車両の減速に対して ACC 走行中に Anti-lock Brake System (ABS)が作動する事象が発生していた。圧雪路面上で滑り摩擦係数が一様でないことからこのようなケースが数件発生した。ABS が作動したすべてのケースでドライバは ACC を OFF とした。このとき、ドライバの RF は高くなった。本研究で適用した ACC による追従走行シミュレーションモデルでは冬期路面で ABS が動作するような状況の再現はできない。冬期路面で ABS が動作するような状況は発生する。今後、実際の冬期路面を想定した ACC による追従シミュレーションを構築し、実道に近い冬期路面のおける ACC の利用条件を明らかにしていくことが必要となる。

また、今後は交通シミュレーションなどを通して、冬期用の設定を用いたときに全体の交通流にどれほどの影響を与えるかといった検討が必要となる。実際の高速道路の走行を想定し、凍結路面などの先読み情報を自動運転に与え、その手前で冬期用の設定とする。この影響が全体の交通の遅れに繋がり得るのかといった検討から、冬期用の設定をさらに絞り込んでいくことが必要となる。

第 6 章　結論

6.1　本論文の成果

6.1.1　周辺認知状況低下が高速道路合流部のリスク顕在化に与える影響の知見

第 3 章では、高速道路での自動運転レベル 2 における一般及び高齢ドライバの客観・主観的な周辺認知状況と合流部におけるオーバーライドの状況について分析し、周辺認知状況低下が高速道路合流部のリスク顕在化に与える影響について明らかにした。

高齢ドライバは、ミラー注視行動・周辺認知行動に対する主観評価の結果から、自動運転レベル 2 に依存した走行となっていたと考えられた。高齢ドライバは、自動運転レベル 2 への過信・依存によって、周辺認知行動に対する低下の影響が一般ドライバよりも大きいという報告があり（例えば、C. Schwarz ら, 2019 [69]; Ho, G. Kiff ら, 2005 [70]）、本研究でも同様の特徴を示したと言えた。また、福田（2009）[71]は、69～80 歳の高齢ドライバは、運転行動に影響を与えると思われる対象物に注意を向けるタイミングが遅くなる傾向があり、何らかの判断を行う際、それを急ぐあまり周りの状況を的確に把握することなく次の運転行動に移る場合があることを明らかにしている。本研究では、このような特徴は、高齢ドライバの合流部でのオーバーライド状況として現れた。高齢ドライバは周辺認知状況の低下によって、合流車両の認知に遅れがあり、自動運転レベル 2 の使い方に対する不安から早く簡単な減速によるオーバーライドを合流部で行っていたと考えられた。周辺認知状況が低下したことで合流部でのオーバーライドに影響が表れた一方で、高齢ドライバは安全確認への意識の維持を一般ドライバより高く評価した。これは、高齢ドライバの自己評価の高さから現れた結果であると考えられる。実際に、鈴木（2010）[53]蓮花ら（2003）[52]は、高齢ドライバは安全運転への自己評価は高い一方で実際の運転行動とは合致しない点がある、意識と行動のミスマッチといった高齢ドライバの問題点を挙げている。

一般ドライバは、高齢ドライバに比べて周辺認知行動の低下は大きくなかった。オーバーライドについてもドライバ運転と自動運転レベル 2 で差異は見られなかった。しかし、一般ドライバは、周辺認知行動に関する主観評価において、安全確認への意識の維持や交通状況への意識の維持に対して懸念を示していた。さらに長距離や長時間の運転となる時、一般ドライバについても合流部で対策を講じる必要があると考えられる。また、周辺認知行動に関する主観評価とミラー注視時間割合の個人別分析で、ミラー注視時間割合が増加しているにも関わらず周辺認知行動に関する主観評価値が低下しているドライバがいた。これらのドライバは確認行動が増えた一方で、目でとらえた情報の認知力が低下していた可能性がある。周辺認知行動に関する過去の研究から、自動運転レベル 2 作動下では目線がよく動いていたとしても目でとらえた情報を認識しているとは限らない。自動運転レベル 2 を使うことで周辺認知行動に対する意識が低下するためである（例えば、de Winter, J.C.F. (2019, 2014) [28, 29], Y. Chung-san (2014) [30], L. Petersen ら(2019) [31]）。

第 3 章では、一般ドライバと高齢ドライバそれぞれの周辺認知状況の低下と、それによ

る合流部での合流車両の認知遅れを懸念する結果を得た。準備状態が低下した状態で走行を続ければ、高速道路の合流部・分流部・事故区間・本線料金所などで起きるリスク事象への対応が遅れ、対応の遅れから事故の発生が懸念される。これに対し、合流部での自動運転車を支援する動きが必要となることが示唆できた。

合流部での自動運転車を支援する動きとして重要なことは、合流部周辺の道路状況のセンシングと HMI によるドライバへの伝達であると考えられる。合流部周辺の状況をセンシングできれば、合流する際のドライバまたは本線を走行するドライバに、道路側から合流部の情報提供を事前に行うことができる。その情報をドライバの認知をサポートする HMI を介してぶつからない合流の仕組みを構築することが望まれる。センシングと HMI によって、周辺認知状況の低下がリスクの顕在化にならないような協調が必要となる。

6.1.2　冬期道路環境における ACC 走行時の危険感の知見

第 4 章では、先行車両の減速と ACC の車間時間設定がドライバの主観的な危険感に与える影響を明らかにした。ACC を用いて高速道路を走行中に先行車両が減速した際の先行車両との追突に対するドライバの主観的危険感（以降、RF）を実車走行実験で計測した。実車走行実験で計測した RF は、TTC 最小値の逆数（以降、$1/TTC_{min}$）からモデル化した。先行車両減速場面を対象とした ACC による追従走行シミュレーションによって求めた TTC 最小値を RF のモデルに入力することで、先行車両の減速度・車間時間設定別に RF を推定した。RF の推定結果から、RF 増大に起因したドライバによる ACC への介入が回避可能となる車間時間設定について検討した。第 4 章では、冬期道路環境での RF を考慮した走行の検討を見据えて、以上の方法論を構築した。

実車実験で計測した $1/TTC_{min}$ の値を用いて RF を運転タイプ別（ドライバ運転、ACC 走行）にモデル化した結果、$1/TTC_{min}$ の値は、RF に有意な影響を与えることが両運転タイプともに確認できた。RF を 1/TTC でモデル化できるといった知見は、ドライバ運転だけではなく ACC 走行についても適用できることを確認した。

先行車両減速時の TTC_{min} を再現できるように、実車走行実験の結果を基にして ACC による追従走行シミュレーションに使用する時定数の推定を行った。時定数が 0.8[sec]の場合、ACC による追従車両の挙動（TTC_{min}）を最もよく再現できるシミュレーションモデルとなった。

ACC による追従走行シミュレーションで推定した TTC_{min} を RF のモデルに入力することで、車間時間設定・先行車両の減速度別に RF を推定した。走行実験でドライバによる ACC への介入が伴った際のドライバの RF と RF の推定結果を比較した。推定した RF が RF_{OR} を超える状況は、先行車両の減速度が 0.3g[m/sec^2]で車間時間設定が 1.3[sec]のときであった。走行実験でのドライバによる ACC への介入結果と一致していることから、シミュレーションによる RF の予測は妥当な数値であると考えられた。

ACC(L)に相当する車間時間設定 2.3[sec]では、推定した RF が最大 2.9 となっており、RF_{OR} の 4.0 まで余裕があった。夏期路面の走行を想定した場合、ACC(L)の車間時間は、RF 増大に起因したドライバによる ACC への介入を回避可能となる車間時間設定として妥当なものであると考えられた。RF を考慮することで、ドライバが介入しない ACC の快適かつ安全な使用方法を検討できると考えられた。第 4 章で構築した RF を検討するための方法論は、冬期道路環境のような、より RF が高まりやすい状況での走行検討に有用であると考えられた。

乾燥路面で車間時間設定 1.3 秒（ACC(S)）をドライバが使用している際、道路側から、工事などによる車線規制区間の開始地点・高速道路上の事故地点・故障車の地点など、イレギュラーな車両の錯綜が起きることが想定される事象に関する情報提供を行い、情報を受け取った車両は、事象の手前で ACC(L)へと自動で変更し、その意図をドライバに伝えることで、RF を増大させずに走行が可能になると考えられる。将来的に路車間通信や車車間通信などのデータから自車の ACC 挙動を制御するとき、RF を考慮することでドライバによる ACC への介入を防ぐことができると考えられた。

6.1.3 冬期路面における ACC の走行速度・車間時間設定の知見

第 5 章では、圧雪路面における網羅的な走行条件を想定し、実車走行実験によるドライバの主観的危険感とシミュレーションによる TTC 最小値から、ACC 走行中の先行車両減速におけるドライバの危険感を求め、冬期路面における ACC の設定（車間時間・速度）の適応条件について検討した。この中で、追突リスクを評価する指標として TTC を用いた。

テストコースでの ACC を用いた実車追従走行実験から、ドライバの先行車両に対する追突への主観的危険感(RF)を計測した。乾燥路面と圧雪路面共に先行車両の減速度と ACC の車間時間設定が RF に対して有意な影響を与えていた。実際に、ACC の車間時間設定が短いとき、先行車両の減速度が大きいときに RF の値が大きくなった。乾燥路面と圧雪路面共に、$1/TTC_{min}$ の値が大きくなるほど RF の値も大きくなった。乾燥路面よりも圧雪路面の方が $1/TTC_{min}$ の増加に対する RF の傾きが急であった。$1/TTC_{min}$ を変数とし、RF を走行速度・路面状態別に示すモデルを求めた。このモデルから、$1/TTC_{min}$ の大きさが同じ値であっても、RF 値は乾燥路面よりも圧雪路面の方が大きくなり、走行速度が大きいほど大きくなる結果となった。

ACC による追従走行シミュレーションを通して、ドライバの RF を推定した。走行実験の先行車両減速においてドライバによる ACC への介入が伴った際のドライバの RF の平均値と路面・速度・車間時間設定別に推定した RF を比較した。RF 増大に起因したドライバによる ACC への介入を発生させないような車間時間・速度設定について検討した。乾燥路面では、ACC(S)・ACC(M)のとき、RF 増大に起因したドライバによる ACC への介入が発生することが分かった。一方、圧雪路面では、走行速度が速いときに、ACC(S)～ACC(L)では、ドライバによる ACC への介入が発生することを明らかにした。圧雪路面での先行車

両接近場面では、車間時間設定は少なくとも 2.3 秒以上必要となることを示唆できた。

圧雪路面では、ACC(SL：車間時間 2.3 秒)、ACC(ML：車間時間 2.8 秒)、ACC(LL：車間時間 3.3 秒)といった、長い設定が必要である。また、道路側から、イレギュラーな車両の錯綜が想定される事象や路面凍結地点に関する情報提供を行い、情報を受け取った車両は事象の手前で走行速度を落とし、ACC(ML：車間時間 2.8 秒)、ACC(LL：車間時間 3.3 秒)のような設定へと自動で変更し、その意図をドライバに伝えるといった連携が必須となると考えられた。

一方、本研究における圧雪路面での走行実験では、先行車両の減速に対して ACC 走行中に Anti-lock Brake System (ABS)が作動する事象が発生していた。圧雪路面上で滑り摩擦係数が一様でないことからこのようなケースが数件発生した。ABS が作動したすべてのケースでドライバは ACC を OFF とした。このとき、ドライバの RF は高くなった。本研究で適用した ACC による追従走行シミュレーションモデルでは冬期路面で ABS が動作するような状況の再現はできない。冬期路面で ABS が動作するような状況は発生する。今後、実際の冬期路面を想定した ACC による追従シミュレーションを構築し、実道に近い冬期路面のおける ACC の利用条件を明らかにしていくことが必要となる。

6.1.4 まとめ

第 3 章から第 5 章にかけて「自動運転レベル 2 利用時の主観的・客観的な周辺認知行動低下が高速道路合流部のオーバーライドに与える影響」、「ACC 走行中の先行車両減速と車間時間設定が RF に与える影響」、「圧雪路面における ACC 走行中の先行車両減速と速度・車間時間設定が RF に与える影響」の知見を得た。第 3 章では、道路側からの合流部などの情報提供を事前に行い、周辺認知状況の低下がリスクの顕在化に至らないような協調が必要なことを示した。第 4 章では、道路側から、工事などによる車線規制区間の開始地点・高速道路上の事故地点・故障車の地点など、イレギュラーな車両の錯綜が起きることが想定される事象に関する情報提供が自動運転の走行に必要なことを示した。第 5 章では、圧雪路面では、市販されている ACC の車間時間設定よりも長い設定が必要であり、道路側から、イレギュラーな車両の錯綜が想定される事象や路面凍結地点に関する情報提供を行い、情報を受け取った車両は事象の手前で走行速度を落とし、長い設定へと自動で変更し、その意図をドライバに伝えるといった連携が必須となることを示した。

何れの知見においても、道路側からのセンシングや情報提供が重要であることを示している。道路側が情報を自動運転に提供するためには、道路側は路面状況、工事などによる車線規制区間の開始地点・高速道路上の事故地点・故障車の地点、合流分流料金所手前の交通状況などの先読み情報を取得し、安全な走行のために有用となる情報を作る必要がある。第 3 章が着目した高速道路合流部では、既に取り組みが進んでおり、合流部において自動運転と道路が連携した走行が可能となりつつある。第 5 章が着目した冬期路面でのイレギュラーな車両の錯綜については、検討がまだ始まったばかりであり、先読み情報の取

得方法を様々な研究が模索している状況となっている。本研究の第 5 章は、凍結路面やイレギュラーな車両錯綜が想定される事象の手間で、自動運転の走行速度を落とし、車間時間設定を現在の市販のものより大きくするといった、冬期での自動運転の実際の動きを提案している。冬期路面での自動運転の走行挙動をどのようにしていくかといった知見は多くない。今後も冬期道路で起こり得る状況を想定し、ある状況下での具体的な自動運転の動き、その時に必要となる道路側からの支援について検討が必要である。

6.2　今後の課題

本研究では、冬期道路環境でドライバが危険を感じずに走ることのできるACCの車間時間・速度設定を示した。一方、冬期用の設定を用いたときに全体の交通流にどれほどの影響を与えるかといった検討が必要となる。実際の高速道路の走行を想定し、凍結路面などの先読み情報を自動運転に与え、その手前で冬期用の設定とする。この影響が全体の交通の遅れに繋がり得るのかといった検討から、冬期用の設定をさらに絞り込んでいくことが必要となる。

自動運転が冬期路面を走行する際、自動運転車両は車線のどこを走るのかといった検討も重要である。冬期路面は、自車以外の交通参加者による走行の影響を受け、路面に圧雪の轍ができる。単に、デジタルな白線を基に自動運転の走行位置を夏期と同様にしてしまうと、轍の影響を受け、車体のスリップの原因となってしまう。前後方向の支援だけではなく、左右方向の支援についても、車両の安定性制御の面から重要な課題の一つであると考えられる。

また、どういう条件になると（どの数値がどの程度であれば)、冬期で自動運転を走行して良いのかといった、使用条件の明確化が必要である。本研究の取り組みは、自動運転がエラーなく作動することを仮定したものとなっており、具体的にどのようなときにエラーが起こるかといった知見は得られていない。冬期では視界や路面の状況が悪化し、道路側による支援があったとしても、自動運転車両そのものが正常に作動しないおそれがある。北海道のような積雪寒冷地で自動運転が運用可能となるには、事故を防ぐ自動運転の制御の検討だけではなく、使用条件の明確化が必要であると考えられる。

謝　辞

本論文は筆者が北海道大学大学院工学院・北方圏環境政策工学専攻・博士後期課程在学中の研究成果をまとめたものです。

同専攻・先端モビリティ工学研究室教授の萩原亨先生には指導教官として、本研究の遂行にあたって終始多大なるご指導を戴きました。ここに深謝の意を表します。

同専攻の内田賢悦先生、高野伸栄先生、高橋翔先生には副査として貴重なご助言を戴きました。ここに深謝の意を表します。

本研究は多くの方の御指導や御支援に支えられてきました。秋田大学の浜岡秀勝先生、近畿大学の多田昌裕先生、名古屋大学の二宮芳樹先生、国立研究開発法人・土木研究所・寒地土木研究所の宗広一徳様、大廣智則様、株式会社ドーコンの内藤利幸様、株式会社デンソーの岡田稔様、栗本昌幸様、株式会社アイサンテクノロジーの細井幹広様には実験の細部に亘ってご指導を戴きました。ここに深く御礼申し上げます。

本専攻、建設管理工学研究室・先端モビリティ工学研究室の各位には研究遂行にあたり日頃より有益なご討論とご助言を戴きました。ここに感謝の意を表します。

本研究の遂行にあたってご協力を賜りました皆様に心より感謝致します。誠にありがとうございました。

2022 年 2 月　和田脩平

参考文献

1. SAE (2016): Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles (Standard No. J3016_201609) (p. 30), SAE International, 2016.
2. 公益社団法人自動車技術会（2018）：自動運転用運転自動化システムのレベル分類及び定義 JASO TP 18004, 2018.
3. 内閣府 (2021)：第 11 次交通安全基本計画 交通事故のない社会を目指して, 中央交通安全対策会議, 2021.
4. 警察庁 (2021)：道路の交通に関する統計 交通重傷事故の発生状況，2021.
5. 内閣府 (2020)：令和元年版交通安全白書，2020.
6. 警視庁交通総務課統計 (2020)：高齢運転者（第 1 当事者）の交通事故発生状況, 2020.
7. 国土交通省 (2020)：第 6 期先進安全自動車（ＡＳＶ）推進計画成果報告における「自動運転システムの事故削減効果評価の検討」, 2020.
8. 経済産業省 (2021)：スマートモビリティチャレンジおける先進実証, https://www.meti.go.jp/press/2021/08/20210824001/20210824001.html（2021 年 10 月）, 2021.
9. 国土交通省 (2021)：中山間地域における道の駅等を拠点とした自動運転サービス, https://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/automated-driving-FOT/index.html（2021 年 10 月）, 2021.
10. 大前学 (2018)：高齢化社会における自動運転車の役割，日本老年医学会雑誌，55 巻 2 号 178-184，2018.
11. 国土交通省 (2019)：ＡＳＶ技術普及状況調査，2019.
12. 本田技研工業株式会社 (2021)：HONDA ホームページ，ニュースリリース「Honda SENSING Elite 搭載 新型「LEGEND」を発売」，2021.
13. 中川由賀 (2020)：道路交通法及び道路運送車両法の改正を踏まえたレベル 3 自動運転車の操作引継ぎ時の交通事故の運転者の刑事責任，CHUKYO LAWYER, Vol. 32, 13-27, 2020.
14. 国土交通省国土技術総合研究所 (2015): 次世代の協調 ITS 開発に関する共同研究報告書, 2015.
15. 渡辺陽介, 高木建太朗, 手嶋茂晴, 二宮芳樹, 佐藤健哉, 高田広章（2015）：協調型運転支援のための交通社会ダイナミックマップの提案, DEIM Forum 2015 F6-6, 2018.
16. 菅沼英明 (2021)：ITS･自動運転の動向と今後 V2X を中心として，電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン，15 巻 2 号，102-108，2021.

17. Intelligent Transport Systems (ITS) (2013): Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service, ETSI EN 302 637-2, 2013.
18. Intelligent Transport Systems (ITS) (2013): Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service, ETSI EN 302 637-3, 2013.
19. 牧野浩志，保坂明夫，鎌田譲治，水谷博之，池田朋広 (2013)：路車協調で作るスマートウェイ，森北出版，2013.
20. S. Guni, S., Peter (2017): A Protocol for Mixed Autonomous and Human-Operated Vehicles at Intersections, International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, November 2017 Lecture Notes in Computer Science, DOI: 10.1007/978-3-319-71682-4_10, 2017.
21. Julio A. S., Javier B., Manuel F., Piedad G., Francisco J. M., Juan-Carlos C., Carlos T. C. and Pietro M. (2015): Sensing Traffic Density Combining V2V and V2I Wireless Communications, Sensors 2015, 15(12), 31794-31810, DOI: 10.3390/s151229889, 2015.
22. S. Kato, S. Tsugawa, K. Tokuda, T. Matsui and H. Fujii (2002): Vehicle control algorithms for cooperative driving with automated vehicles and intervehicle communications, in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 3, no. 3, pp. 155-161, Sept. 2002, doi: 10.1109/TITS.2002.802929.
23. L. Hobert, A. Festag, I. Llatser, L. Altomare, F. Visintainer and A. Kovacs (2015): Enhancements of V2X communication in support of cooperative autonomous driving," in IEEE Communications Magazine, vol. 53, no. 12, pp. 64-70, Dec. 2015, doi: 10.1109/MCOM.2015.7355568.
24. 松林翔太, 松林翔太, 松林翔太, 三輪和久, 山口拓真, 山口拓真, 神谷貴文, 鈴木達也, 池浦良淳, 早川聡一郎, 伊藤隆文, 武藤健二 (2016)：運転支援方法とユーザビリティ・行動変容の関係に関する実験的検討，日本認知科学会第 33 回大会講演論文集，pp.595-601, 2016.
25. Beggiano, M., Pereira, M., Petzoldt, T., and Krems, J., Learning and development of trust, acceptance and the mental model of ACC. A longitudinal on-road study., Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 35, pp.75-84 (2015).
26. 山中直明 (2021): リアルタイムなデータを活用した 5 G 時代のエッジコンピューティング～自動運転に見るダイナミックビッグデータビジネス～, 電波技術協会報 FORN, 340 巻, 10-13, 2021.

27. 四方隼人, 山下哲生, 荒井光司, 中野貴之, 畑中健一, 藤川裕之 (2019): 車両シミュレーションと実車検証を統合するデジタルツイン環境の構築, SEI テクニカルレビュー, 第 194 号，14-18, 2019.
28. de Winter, J.C.F., Happee R., Martens,M.H., Stanton, N.A.: Effects of adaptive cruise control and highly automated driving on workload and situation awareness: A review of the empirical evidence, Transportation Research Part Ｆ, 27, 196-217, 2014
29. de Winter, J.C.F., Eisma, Y.B., Cabrall, C.D.D., P.A.Hancock, N.A.Stanton: Situation awareness based on eye movements in relation to the task environment, Cognition, Technology & Work, Volume 21, Issue 1, pp 99–111, 2019
30. Chung-san Yu, Eric Min-yang Wang, Wen-Chin Li, G.R.Braithwaite: Pilots' Visual Scan Pattern and Situation Awareness in Flight Operations, Aviation Space and Environmental Medicine, volume85, Issue 7, pp.708-714,2014
31. Petersen, L., Robert, L., Yang, X., and Tilbury, D.: "Situational Awareness, Driver's Trust in Automated Driving Systems and Secondary Task PeRFormance," SAE Int.J.of CAV 2(2):2019, doi:10.4271/12-02-02-0009
32. 本間亮平，若杉貴志，小高賢二：高度自動運転における権限移譲方法の基礎的検討（第 1 報） －覚醒度の低下や運転以外の作業による影響－自動車技術会論文集 47(2), 537-542, 2015.
33. Endsley, Mica R., Kiris, Esin O.: The Out-of-the-Loop PeRFor mance Problem and Level of Control in Automation: Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, Volume: 37 issue: 2, pages: 381-394.,1995
34. ISO (1999): Road vehicles-advanced cruise control systems-performance requirements and test procedures, ISO/DIS15622, 1999.
35. 伊藤　誠 (2008)：状況認識の強化と ACC 機能限界の理解支援のための減速度表示，計測自動制御学会論文集，44 巻 11 号，pp. 863-870，2008.
36. Ahmed, H.U.; Huang, Y., Lu, P. (2021) A Review of Car-Following Models and Modeling Tools for Human and Autonomous-Ready Driving Behaviors in Micro-Simulation. Smart Cities 2021, 4, 314–335. DOI: 10.3390/smartcities4010019.
37. 高橋 昭彦, 佐藤 稔久, 北﨑 智之, 平尾 章成 (2019)：運転支援システムの理解度がドライバの精神的負担に与える影響―ACC および LKA を搭載した実車での実路走行評価―, 自動車技術会論文集，50 巻 2 号 pp. 486-491，2019.
38. J.Lee & N.Moray (1992): "Trust, control strategies and allocation of function in human-machine systems," Ergonomics, Vol.35, No.10, pp.1243-1270.
39. 平岡 敏洋, 劉 海龍, 田中 誠也 (2020)：運転支援システム利用時におけるドライバの信頼状態と運転行動，自動車技術会論文集，51 巻 2 号 pp. 360-466，2020.
40. 二宮 芳樹 (2020)：社会導入に向けた自動運転のあり方，日本ロボット学会誌，38 巻 1

号 pp. 47-51，2020.

41. Blanco, M., Atwood, J., Vasquez, H.M., Trimble, T.E., Fitchett, V.L., Radlbeck, J., ...& Morgan, J.F.: Human Factors Evaluation of Level 2 and Level 3 Automated Driving Concepts: Washington DC: National Highway Traffic Safety Administration Report No.DOT HS 812 182.,2015
42. Christian Braunagel, Wolfgang Rosenstiel, Enkelejda Kasneci. Ready for Take-Over? A New Driver Assistance System for an Automated Classification of Driver Take-Over Readiness. Published in: IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine . Volume: 9, Issue: 4, winter 2017
43. Tyron Louw, Natasha Merat. Are you in the loop? Using gaze dispersion to understand driver visual attention during vehicle automation. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 76, March 2017, Pages 35-50.
44. Guy H.Walker, Neville A. Stanton, Mark S. Young. Feedback and driver situation awareness (SA): A comparison of SA measures and contexts. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour. Volume 11, Issue 4, July 2008, Pages 282-299
45. C.M. Rudin-Brown, H.A. Parker (2004): Behavioural adaptation to adaptive cruise control (ACC): Implications for preventive strategies, Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 7, pp. 59-76, 2004.
46. Larsson, A. F., Kircher, K., & Hultgren, J. A. (2014): Learning from experience: Familiarity with ACC and responding to a cut-in situation in automated driving. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 27, 229–237, 2014.
47. Lisa J.Molnar, Anuj K.Pradhan, David W.Eby, Lindsay H.Ryan, Renée M.St.Louis, Jennifer Zakrajsek, Brittany Ross, Brian T.Lin, Chen Liang, Bethany Zalewski, and Liang Zhang: Age-Related Differences in Driver Behavior Associated with Automated Vehicles and the Transfer of Control between Automated and Manual Control: A Simulator Evaluation.Technical Report, UMTRI 2017-4, University of Michigan Transportation Research Institute.,2017
48. Ragnhild J.DAVIDSE: Older Drivers and ADAS -Which Sys tems Improve Road Safety-, IATSS RESEARCH, Vol.30, No.1, pp.6-20,2006
49. Fildesa B., Keall M., Bos N., Lie A., Page Y., Pastor C., Pennisi L., Rizzi M., Thomas P., Tingvall C.: Effectiveness of autonomous emergency braking in real-world rear-end crash Accident Analysis and Prevention 81, pp25-29,2015
50. Montamedi S., Reis F.G., and Wang J.H.: Understanding Older Adult Drivers Driving Challenges and Finding In-vehicle Technology to Ease There Challenges, Paper presented at the 97the Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2017
51. 花守輝明，関谷浩孝，御器谷昭央：自動運転機能利用による運転者の疲労軽減効果に関する研究，第 41 回交通工学研究発表会論文集，No.13，79-82，2021.
52. 蓮花一己, 石橋富和, 尾入正哲, 太田博雄, 恒成茂行, 向井希宏 (2003)：高齢ドライバの運

転パフォーマンスとハザード知覚，応用心理学研究，29(1)，pp. 1-16, 2003.
53. 鈴木春男 (2010)：高齢ドライバに対する交通安全の動機づけ–交通社会学的視点–，国際交通安全学会誌，35 巻 3 号，pp. 194-202, 2010.
54. 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，国際交通安全学会誌，Vol. 26, No. 1, pp. 12~22, 2000.
55. 亀井利明（1995）：『危機管理と保険理論』法律文化社，1995.
56. E. P. Lalley (1982): Corporate uncertainty and risk management, Risk Management Society Publishing, 1982.
57. Brown, I. D. & Groeger, J. A. (1998) : Risk perception and decision taking during the transition Between novice and experienced driver status, Ergonomics, Vol.31, pp.585-597, 1988.
58. K., Vogel (2003): A comparison of headway and time to collision as safety indicators, Accident Analysis & Prevention, Volume 35, Issue 3, Pages 427-433, 2003.
59. 山村　智弘，久家　伸友，マクローリン シェーン，ハンキー ジョナサン：ナチュラリスティックな運転行動データを用いた先行車接近時における顕在的なリスク感の定量化に関する研究，自動車技術会論文集，39 巻 6 号，pp.253-258，2008.
60. Winsum, W. V., Heino, A.(1996): Choice of time-headway in car-following and the role of time-to-collision information in braking, Ergonomics, vol.39, No.4, p.579-592(1996).
61. Sultan, B., McDonald, M. (2003): Assessing the safety benefit of automatic collision avoidance systems (during emergency braking situations). In: The 18th International Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Nagoya, Japan.
62. 日本視覚学会 編 (2000)：視覚情報処理ハンドブック，朝倉書店，2000.
63. Kondoh, T., Yamamura, T., Kitazaki, S., Kuge,N. and Boer, E.R. (2008): Identification of Visual Cues and Quantification of Driver's Perception of Proximity Risk to the Lead Vehicle in Car-Following Situations, Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics 2008, Vol.1, No.2, 2008.
64. Christopher, K.S., Zhirui, Y., Xianming, S. (2010) Safety Effects of Winter Weather: The State of Knowledge and Remaining Challenges, Transport Reviews, 30:6, 677-699, DOI: 10.1080/01441640903414470
65. Hjelkrem, A.O., Ryeng, O.E. (2016): Chosen risk level during car-following in adverse weather conditions: Accident Analysis & Prevention: Vol. 95; Part A; October 2016; Pages 227-235
66. 萩原亨，杉谷慧，加藤佑基，遠藤幹大，大廣智則 (2019)：ドライビ ングシミュレータを用いた ACC 利用時の冬期路面におけるドライバのオーバーライドに関する研究，自動車技術会論文集，50 巻 4 号，pp. 1095-1101，2019.
67. 加藤佑基，萩原亨，岡田稔，内藤利幸，宗広一徳 (2019)：速度協調システム利用時にドライバがシステム介入したときの冬期の道路状況に関する研究，自動車技術会論文

集，50 巻 4 号 pp. 1120-1125，2019.

68. Koglbauer, I., Holzinger, J., Eichberger, A., Lex, C. (2017): Drivers' Interaction with Adaptive Cruise Control on Dry and Snowy Roads with Various Tire-Road Grip Potentials: Journal of Advanced Transportation: 2017 (3): 1-10, Article ID 5496837.
69. Schwarz, C., Gaspar, J.& Brown, The effect of reliability on drivers' trust and behavior in conditional automation, Cognition, Technology & Work, Volume 21, Issue 1, pp 41–54, 2019
70. Ho, G., Kiff, L.M., Plocher, T., Haigh, K.Z.: A model of trust & reliance of automation technology for older users, AAAI-2005 Fall Symposium: Caring Machines: AI in Eldercare, 2005
71. 福田亮子 (2009): 高齢ドライバーの視覚情報受容と運転行動, 人間工学, 45 巻 3 号, pp. 183-188, 2009.
72. 北嶋一欽, 山本公之，早川祥史 (2020): 自動運転車支援のための協調型 ITS 合流支援システム, 三菱重工技報(Web)（Mitsubishi Heavy Industries Technical Review (Web)), 57 巻，2020.
73. 菊池典恭, 矢野貴大, 中林昭一, 金子 富, 浜口雅春 (2021): 自動運転のための合流支援システムによる車両挙動安定性の評価, 情報処理学会論文誌, 62 巻 4 号, 1128-1141, 2021.
74. 国土技術総合研究所（2021）:「路車協調 ITS による自動運転の実現に向けた取り組み」, 国総研講演会, 2021.
75. 丸山凌平, 高橋翔, 萩原亨, 寺倉嘉宏 (2021): 高速道路合流部における AR を用いた HMI による合流行動支援とその有効性の検証, ヒューマンインタフェース学会論文誌, 23 巻 1 号, 2021.
76. 河合レナ, 萩原亨, 高橋翔, 寺倉嘉宏, 大石侑亮 (2021): ACC (Adaptive Cruise Control) 利用時における速度誘導灯を用いた高速道路合流部でのドライバの錯綜回避行動に関する研究, 交通工学論文集特集号 A, 7 巻 2 号, 2021.
77. Lee, J. D., McGehee, D.V., Brown, T.L. and Marshall, D. C. (2006): Effects of Adaptive Cruise Control and Alert Modality on Driver Performance, Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No.1980, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 49–56, 2006.
78. T. Liu, H. Zhou, M. Itoh and S. Kitazaki (2018): The Impact of Explanation on Possibility of Hazard Detection Failure on Driver Intervention under Partial Driving Automation, 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Changshu, 2018, pp. 150-155, doi: 10.1109/IVS.2018.8500521.
79. B. Barabino, M. Coni, A. Olivo, G. Pungillo and N. Rassu (2019): Standing Passenger Comfort: A New Scale for Evaluating the Real-Time Driving Style of Bus Transit Services, in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 20, no. 12, pp. 4665-4678, Dec. 2019, doi: 10.1109/TITS.2019.2921807.
80. K. Hubeny (1959): Weiterentwicklung der Gauss'schen Mittelbreitenformeln, Z.Vermess, 84,

159-163, 1959.

81. Sato, H., Tanabe, T., Murase, H., Tominari, M., Kawai, M. (2017): Application of a wearable GPS unit for examining interindividual distances in a herd of Thoroughbred dams and their foals: J Equine Sci. 2017; 28(1): 13–17: Published online 2017 Mar 28: doi: 10.1294/jes.28.13
82. 近藤 崇之 (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, pp.23-26, 2005.
83. 鈴木 桂輔，菊池 一範，片山 硬（2004）：ドライバのシチュエーションアウェアネスの評価手法に関する研究，自動車技術会論文集，35 巻 4 号，pp.191-196，2004.
84. Zhao, L., Sun, J. (2013) Simulation Framework for Vehicle Platooning and Car-following Behaviors Under Connected-vehicle Environment, Procedia - Social and Behavioral Sciences, Volume 96, pp.914-924, DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.08.105.
85. Arem, van B., Driel, van C. J. G., Visser, R. (2006) The Impact of Cooperative Adaptive Cruise Control on Traffic-Flow Characteristics, in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 7, no. 4, pp. 429-436, DOI: 10.1109/TITS.2006.884615.
86. 和田脩平, 高橋翔, 白石直之, 宗広一徳, 岡田稔, 内藤利幸, 萩原亨 (2021): 冬期道路環境への ACC(Adaptive Cruise Control)の適応条件に関する基礎的研究, 交通工学論文集（特集号）, No.7, pp.289 - 297.
87. Hagiwara, T., Kato, Y., Kishi,K., Okada, M., Naito, T., Munehiro, K., Nagata, Y. (2019): Influence of road configuration and winter road condition on the driver's interaction with an adaptive cruise control system: Paper presented at the Transportation Research Board TRB 98th Annual Meeting: January 13–17, 2019.
88. Shiraishi, N., Takahashi, S., Hagiwara, T., Okada, M., Naito, T., Munehiro, K. (2021) Effects of Winter Road Surface on Driver's Risk Avoidance Behavior when the Vehicles Are Entering a Curve Operated with Adaptive Cruise Control, Paper presented at the Transportation Research Board TRB 100th Annual Meeting, January 21–29, 2021.