

ドライビングシミュレータを用いた 冬期道路・ACC利用時のドライバの 危険回避運転行動に関する研究

川島 彰悟¹・和田 脩平²・大廣 智則³・高橋 翔⁴・萩原 亨⁵

¹学生会員 北海道大学 大学院工学院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)
E-mail: shogo_kawashima@eis.hokudai.ac.jp

²学生会員 北海道大学 大学院工学院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)
E-mail: shuheiwada@eis.hokudai.ac.jp

³正会員 (株)ネクスコ・エンジニアリング北海道 企画部 (〒003-0005 北海道札幌市白石区東札幌5条4丁目3-20)
E-mail: ohrtomonory@yahoo.co.jp

⁴正会員 北海道大学准教授 大学院工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)
E-mail: stakahashi@eng.hokudai.ac.jp

⁵正会員 北海道大学教授 大学院工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)
E-mail: hagiwara@eng.hokudai.ac.jp

現在、自動運転車が積雪・凍結路面を走行する方法について多くの調査がなされている。しかし、ACCを冬期道路環境で用いたときの影響とその時のドライバ挙動に関する報告はあまりされていない。そこで本研究では、冬期道路環境においてACC利用時に先行車の急減速に直面した際のドライバの危険回避運転行動を明らかにすることを目的としている。ドライビングシミュレータ上に冬期の札幌自動車道を再現し、43人実験参加者の運転行動から冬期道路環境における先行車の急減速に対する走行速度(80km/h, 60km/h)、道路線形(直線, 左カーブ)、路面状態(乾燥, 圧雪, 凍結)の影響を検証した。その結果、TTCを指標とすることでドライバの運転行動を評価できる可能性があることを示唆できた。

Key Words : *Safety, Winter Road Condition, Driver's Risk Avoidance Behavior, Automated Vehicle*

1. はじめに

冬期は路面凍結や視界不良などが原因で、運転に困難を感じるドライバが多い。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冬期に長距離移動を強いられる場面がある。そのため、夏期に比べ冬期のほうが自動運転システムに対する期待は高い。しかし、冬期道路環境は路面が低 μ 路になるあるいは視界が悪化するなどの理由から、Adaptive Cruise Control (以降, ACC)などの低いレベルの自動運転システムですら冬期に利用できる場面は多くない。このため、冬期における自動運転システムの導入について様々な検討がなされ始めている。

例えば、米国デトロイトのテストコースで2016年度冬期から自動運転システムがテストされている。2018年1月の米国道路交通運輸会議 (TRB年次総会) のSession

614で、"Connected and Autonomous Vehicle Sensory System Performance Under Adverse Weather Conditions"と題し、冬期における自動運転について、道路技術者側で議論された。冬期道路の道路環境における自動運転システムの動作に関する様々な実験と調査が道路側及び自動車側から始められている^{1,2)}。フィンランドでは、冬期における自動運転車の走行に関するプロジェクトが2017年度から開始されている。雪氷路面での走行の可否、降雪時の影響などの調査がなされている。また、萩原らはドライビングシミュレータ (以降, DS) を用いて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³⁾。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。さらに、加藤らは様々な路面となる実道条件で、ACC走行車を利

用したときのオーバーライド条件をテストした⁴⁾。路面のすべり抵抗値が低下しているときにオーバーライドが増えること、道路線形が路面と相乗効果となりオーバーライドに大きな影響を与えることを示した。

本調査では、冬期道路環境においてACC利用時のドライバによるオーバーライド発生に関する条件とそのときの運転行動について明らかにすることを目的とした。具体的には、冬期道路環境においてACCを用いた高速道路走行中に、先行車が減速する場面を想定する。道路線形・路面状態及びACCの設定速度がドライバの主観的な危機感及びオーバーライド行動に与える影響を検証する。実際の道路でこのような状況を再現することはできなく、本研究ではドライビングシミュレータ（以降、DS）を用いて実験参加者による実験を行った。

2. 実験方法

(1) 実験参加者

2020年1月と2月に北海道大学工学部土木工学研究棟403号室で、DS実験を実施した。運転免許を保持している北海道大学の学生を中心とした43名（男性25名、女性18名、平均年齢40.7歳）がドライバとしてDS実験に参加した。雪道での走行経験があった実験参加者数は33名（雪道経験豊富、週に1回以上雪道で運転している）、ほとんどなかった実験参加者数は10名であった。DS実験開始前に、実験参加者に対して実験実施者から口頭及び書面にて実験の役割・危険性・緊急時の対応・参加者の権利・プライバシー保護などについて説明した。説明終了後、実験参加者の全員が実験参加の同意書に署名した。また、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。

(2) ドライビングシミュレータ

本実験で使用したDSは、「UC-win/Roadドライブ・シミュレータ（株式会社フォーラムエイト）である。車内から見える映像を表示する3つの画面（各々32インチ）と、簡易の運転席で構成される。自車（実験参加者が運転する車両）の運転席には一般車と同様にハンドル、シートベルト、シフトレバー、サイドブレーキが搭載されており、座席位置の調節やリクライニングも一般車と同様に行えるようになっている。UC-win/Road Ver.13を用いて実験対象となる道路区間を作成し、DSの運転シナリオを制作した。また、一般車と近い操作感を持ったACC機能を株式会社フォーラムエイトへの外注により付加した。

(A) 圧雪路面（凍結路面も見た目は同じ）



(B) 乾燥路面



図-1 札幌自動車道に再現した道路空間と2種類の路面状態

(3) DSで再現した道路区間

NEXCO 東日本が管理している札幌自動車道（小樽方面）の銭函ICから張碓トンネル入り口までの約7km区間をUC-win/Road Ver.13を用いて再現した。道路データ作成には国土地理院の地形データ、日本道路公団（現NEXCO 東日本）の札幌自動車道完成図の横断面・縦断面・平面図を参考にした。DS上で、降雪による視程環境を再現した。また、乾燥路面・圧雪路面の二種類を用意し、道路上の雪や轍、除雪による道路脇の堆雪を再現した。ただし、ACC動作時の路面のすべり摩擦係数をDSの設計から変更できなく、路面の影響はドライバへの視覚的な影響のみとなっている。図-1に圧雪路面と乾燥路面のときのドライバからの視野画像を示す。

(4) ACCの設定と先行車の減速シナリオ

走行開始から終了までの7km区間で、実験参加者はACCを用いて自車を運転した。このACCはUC-win/Road13上で市販車に搭載されているACCを疑似的に再現した。このため、市販車に搭載されているものと同動作条件などは異なる。実験実施者が予めDSの走行前にACCの車速・車間距離を定めたシナリオを準備する。ドライバがDSによる自車をスタート後、ACCで走行する速度付近で先行車を追従し安定した速度となったとき、実験実施者がドライバに声をかけハンドルにあるACC開始ボタンをドライバに押すようアナウンスする。ドラ

イバがボタンを押すと ACC が開始され、ドライバは速度調整が不要となる。走行画面の下に表示される「ACC ○○km/h」という表示から ACC が作動していることをドライバは確認できる。ACC 動作中、ACC は先行車の車速変化に合わせ、セットされた車速を上限とし車間距離を保ちながら追従走行する。ACC 走行中にドライバがブレーキペダルを踏んだ時、ACC は解除され、通常の運転に切り替わる。ACC を再度動作させるとき、ドライバが任意のタイミングで前述のボタンを押す。

本実験における先行車の走行速度は、80km/hあるいは60km/hとし、後続車となる自車は先行車と同じ速度で追従する。また、先行車のストップランプの見え方を考え、先行車との車間距離が同程度になるように先行車との THW (車間時間) を設定した。ここで用いた THW は、先行車がある地点を通過した後で、自車はその地点を通過するまでの時間のことを言う。80km/h のときは THW を 2 秒、60km/h のときは THW を 2.7 秒とした。

実験条件として、図-2 に示す 4 か所のうち 2 か所で先行車が減速する事象を設定した。先行車は、5 秒間かけて 80km/h では 50km/h まで、60km/h では 30km/h まで、それぞれ減速する。このとき自車は ACC により自動減速を行うが、路面のすべりを考慮し、乾燥路面・圧雪路面・凍結路面の 3 種類を用意した。乾燥路面の自車の減速度は、乾燥路面においては約-0.4g、圧雪路面においては約-0.2g、凍結路面においては約-0.1g とした。このとき、先行車のストップランプは点灯する。5 秒間の減速終了後、先行車は再び元の速度に回復する。減速を開始する地点は、道路線形の影響を調べるため直線区間の中央付近の地点、左カーブの円曲線開始地点とした。カーブの曲線半径は 500m 以下であり、高速道路としては急カーブとなる。なお、1 回の走行の中で減速が起きるのは 2 度とした。

(5) 計測項目

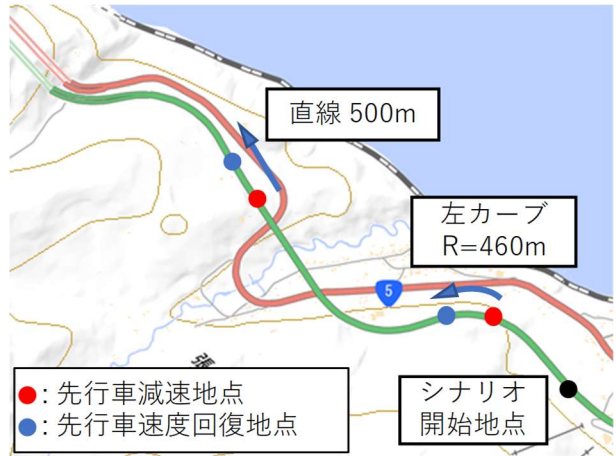
(a) 主観評価方法

実験参加者は各走行シナリオの運転終了後、先行車がブレーキで減速したときの主観評価として、7 段階評価手法を用いて「追突の危険を感じたか」を評価した。実験参加者は、図-3 に示す質問に回答した。直感的に 7 箇所の交点の中でことと思うところに○をするよう説明した。左側が「危険を感じた」、右側が「危険を感じなかった」とした。

(b) 運転行動と車両挙動の計測

運転行動として、先行車が減速を開始後に追突の危険を回避するためブレーキを踏んだかどうかを計測した(以降、オーバーライドと呼ぶ)。車両挙動として、先行車が減速を開始する瞬間から、先行車が設定した最低速度となり、その速度を回復するまでの間の自車の速度

(A) 銭函インターと張碓トンネル間



(B) 張碓トンネルと朝里インター間



図-2 先行車が減速を行った地点

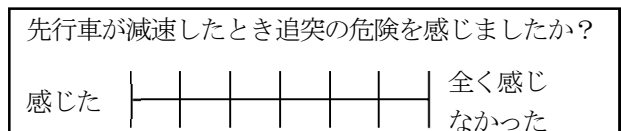


図-3 「追突の危険を感じましたか」の質問用紙

表-1 2つの要因と各々の要因における水準

要因	水準	
速度	80km/h	走行速度: 80km/h
	60km/h	走行速度: 60km/h
道路線形	直線	直線距離: 300~500m
	左カーブ	曲線半径: 460~490m
路面状態	乾燥	乾燥路面
	圧雪	圧雪路面
	凍結	凍結路面

変化、車間距離変化を計測した。

総走行回数 258 回 (43 人×6 走行) の走行を分析した。減速開始距離と同様に、自車と先行車の関係から自車がブレーキにより減速開始したときの TTC を求めた。ブレーキを踏まなかったときには、先行車が速度を

回復するまでの間における最小の TTC を求めた。

(6) 実験設計

ACC 使用時における先行車の減速による運転行動を評価するため、3つの要因「走行速度(2水準)・道路線形(2水準)・路面状態(3水準)」を設定した(表-1)。走行速度は80km/h・60km/h、道路線形は直線・左カーブ、路面状態は乾燥・圧雪・凍結である。3要因の水準の組み合わせは、2×2×3=12通りとなる。表-2に示す走行シナリオは各走行2回の減速を含む6通りとし、各々に対応する走行シナリオをDSにて作成した。実験実施時には、カウンターバランスを考慮し、シナリオの実験順をランダムとした。

(7) 実験手順

実験時間は3時間程度であった。走行前に約30分かけて実験参加者に実験の説明を行った。ACCの機能について、特に詳しく説明した。本実験で使用するACCは設定速度を変更することはできないこと、ACCの設定速度・車間距離はあらかじめ設定している旨を伝えた。また、先行車が減速した際に、危険を感じた場合、ブレーキを踏んで回避してもよいこと、ブレーキを踏むとACCがOFFになり、自車の速度を自分で調整しなければならないことを伝えた。さらに、ACCが作動しているときACC0km/h(0km/hは設定速度)が画面の中央下に表示されることについても説明した。

説明後、各実験参加者は銭函ICから4km進んだ地点から小樽JCTまでの約7km区間を練習走行した。練習走行は、実験参加者がDSにおけるACCによる運転時の車両ハンドル操作への習熟及び先行車がブレーキを踏む事象についての体験することを主な目的とした。練習走行後に、2名の実験参加者は交互に6回走行した。

3. 実験結果

(1) 危険感に関する主観評価の分散分析

図4に要因別・水準別の平均値と標準偏差を示す。分散分析(3要因)を用いて危険感(「危険を感じた」を1,「危険を感じなかった」を7として数値化)に関する平均値の差異を検定した。

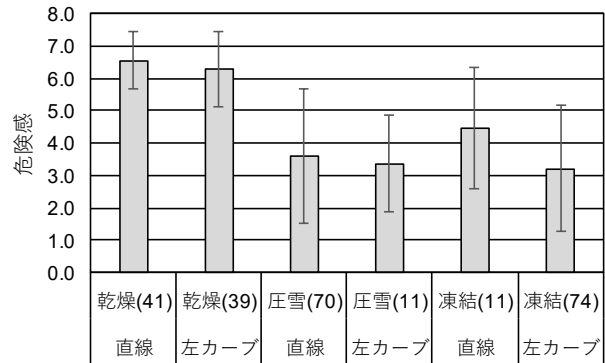
(2) オーバーライドの計測結果

本調査では、先行車が減速後から速度を回復するまでの間にドライバがブレーキを踏んだとき、オーバーライド有と判断した。圧雪路面と凍結路面では、全ての走行でオーバーライド有となった。表-3に、乾燥路面における速度別・線形別のオーバーライド有の走行回数とオー

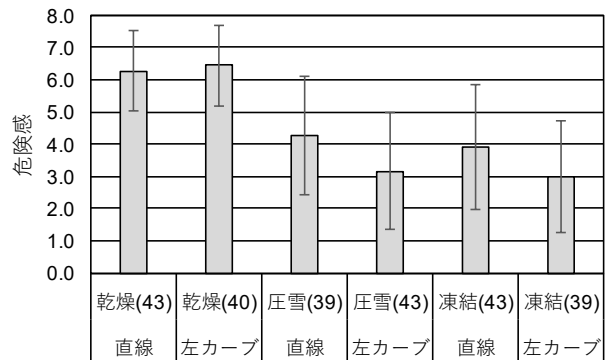
表-2 8種類のシナリオ

	速度 (km/h)	1回目		2回目	
		道路線形	路面状態	道路線形	路面状態
1	80	左カーブ	乾燥	直線	乾燥
2	60	直線	乾燥	左カーブ	乾燥
3	80	直線	凍結	左カーブ	圧雪
4	80	左カーブ	凍結	直線	圧雪
5	60	左カーブ	圧雪	直線	凍結
6	60	直線	圧雪	左カーブ	凍結

(A) 80km/h



(B) 60km/h



(注) ()内の数値は計測数

図4 要因別・水準別の危険感の平均値と標準偏差

表-3 オーバーライド有の回数(乾燥路面)

	80km/h		60km/h	
	左カーブ	直線	左カーブ	直線
オーバーライド有	9	10	16	12
オーバーライド無	30	31	24	31
NA	4	2	3	3

バーライド無の走行回数を示す。オーバーライド有となった走行数は80km/hのときより60km/hのとき高く、その構成率は約35%となった。また、60km/hのとき、左カーブで直線よりもオーバーライド有が多くなった。

(3) TTCに関する調査結果

(a) 乾燥路面におけるTTCの計測結果

先行車減速時のドライバの行動を明らかにするため、自車と先行車との間のTTC（衝突余裕時間）を求めた。ここで用いたTTCは、現在の相対速度が維持されたとき、あと何秒で衝突するか値である。図-5に乾燥路面・直線の80km/hにおける実験参加者の速度変化とTTCの変化、及びブレーキ入力値を示す。ブレーキ入力値は、ドライバとACCによるブレーキ量の両方を含んでおり、DS上で記録される最小値は0.0、最大値は1.0である。

オーバーライド有の場合（図-5(A)）、赤の縦線がドライバがブレーキを踏んだ位置となっている。ドライバが先行車への追突の危機を感じてブレーキを踏んだ地点と考え、このTTCを走行の代表値とした。一方、オーバーライド無の場合（図-5(B)）、TTCはU字のカーブを描いた。先行車が減速を開始するとTTCが徐々に短くなり、減速を終了した地点でTTCが最小となる。その後、先行車の速度が回復するとき、TTCは再び大きくなる。オーバーライド無のとき、このU字カーブの最下端（最小値）でのTTCをこの走行の代表値とした。

(b) 圧雪路面と凍結路面におけるTTCの計測結果

図-6に圧雪路面・直線と凍結路面・直線の80km/hにおける実験参加者の速度変化とTTCの変化、及びブレーキ入力値を示す。橙線の先行車の速度変化が両路面で同じになっている一方、自車の速度変化を示す青線の傾きが異なっている。乾燥路面（図-5(A)）、圧雪路面（図-6(A)）、凍結路面（図-6(B)）となるにしたがって設定した減速度が小さくなるため、速度変化が緩くなっていることがわかる。赤の縦線がドライバがブレーキを踏んだ位置となっている。ドライバが先行車への追突の危機を感じてブレーキを踏んだ地点と考え、このTTCを走行の代表値とした。

(c) TTCの計測結果

図-7に要因別・水準別のTTCの平均値と標準偏差を示す。乾燥路面においてのみ、オーバーライド有とオーバーライド無に分けて示した。80km/hと60km/hの両者において、乾燥路面・オーバーライド有のときTTC（秒）が最も長くなった。図-5(A)で示したように先行車が減速する間、減速しながらも先行車に接近する自車に不安を感じ、安全のためにブレーキを踏んでオーバーライドした実験参加者が多くなると考えられる。一方、乾燥路面では、オーバーライドしなかったケースもオーバーライド有と同程度あった。そのときのACCによって最小となったTTC（秒）は、図-7からわかるように圧雪路面および凍結路面のTTC（秒）と同程度であった。また、圧雪路面と凍結路面のTTC（秒）を80km/hと60km/hで比較すると、80km/hのとき5秒程度長くなっていた。両速度とも線形による差異はほとんど見られなかった。

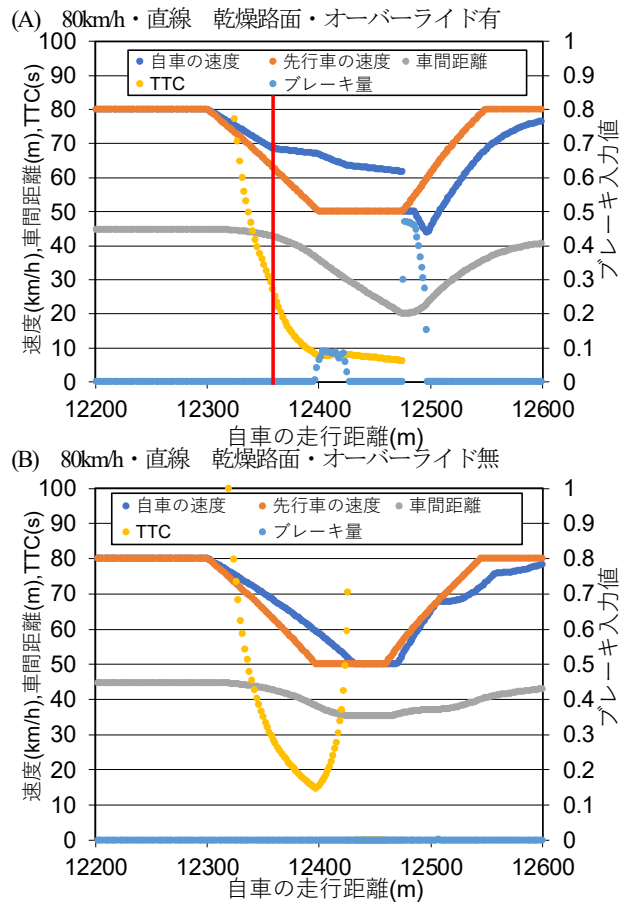


図-5 乾燥路面におけるオーバーライド有無のときのTTC

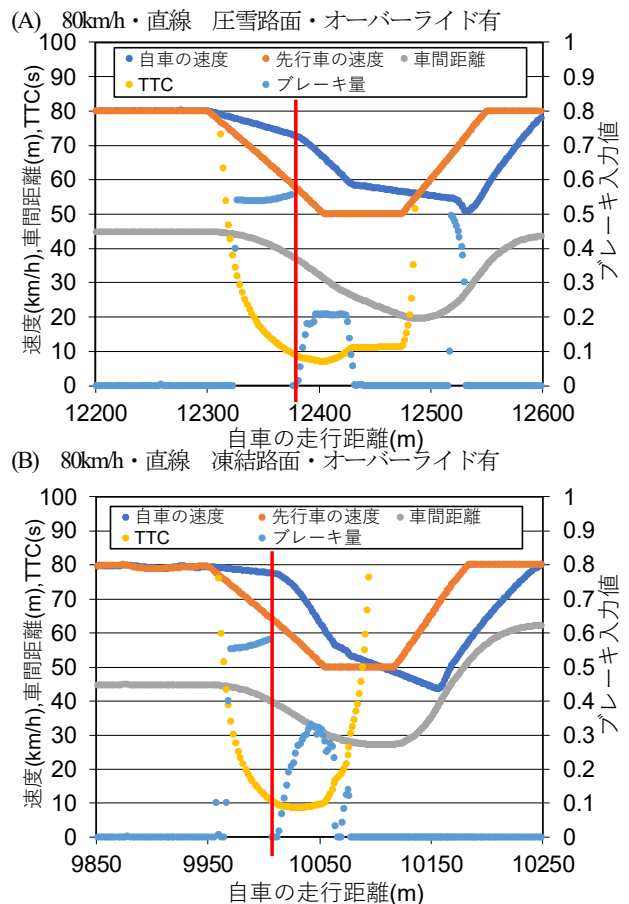


図-6 圧雪路面と凍結路面におけるTTC

表-4 最尤推定結果

最尤推定量	T値
β_0 : -10.5	-2.54
β_1 : 73.0	4.04
β_2 : 0.212	12.54
r の標準偏差 : 8.64	

(4) TTCに関する要因分析

TTC (秒) を目的変数とし、道路線形・路面状態・速度の3要因にを説明変数とした最尤法による一般化線形混合モデル (1式) を用いてパラメータを推定した。尤度比検定の結果、線形モデルは有意 (1%水準) となった。推定した要因別のパラメータの結果から路面状態と速度は有意 (1%水準) となった。パラメータの推定結果を表-4に示す。そのモデルを用いて予測したTTCと計測したTTCの関係を図-8に示す。

$$TTC_i = \beta_0 + \beta_1 Deceleration_i + \beta_2 V_i + r_i \quad (1)$$

ここで、

TTC : TTCの値 (秒)

β_0 β_1 β_2 : パラメータ

Deceleration : 路面別にと与えた減速度 (g)

V : 走行速度 (km/h)

r : ランダム効果

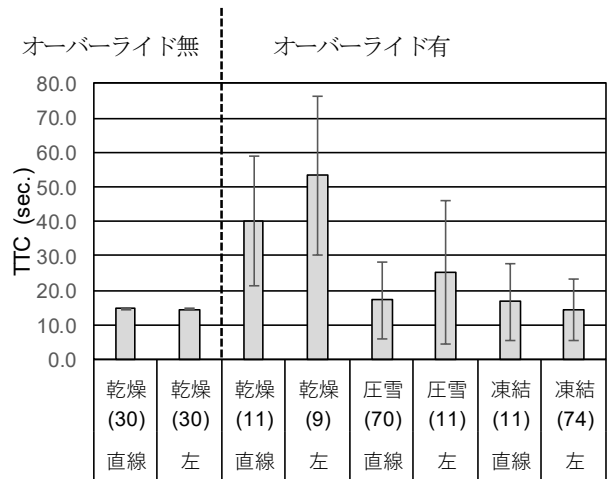
4. まとめ

本研究では、ドライビングシミュレータを用いてACCが冬期において利用可能となった状況を想定し、前方の車両が減速したときのACC車を運転しているドライバの危険感と運転行動について検討した。実験参加者の主観的な危険感には路面の影響が大きく、圧雪路面と雪氷路面のときにドライバの危険感が高まった。また、先行車減速時のドライバ行動をTTCから分析した。本研究におけるオーバーライド時のTTCは、先行車の減速により追突する不安を示している。圧雪・凍結路面ではすべての走行でオーバーライドとなった。

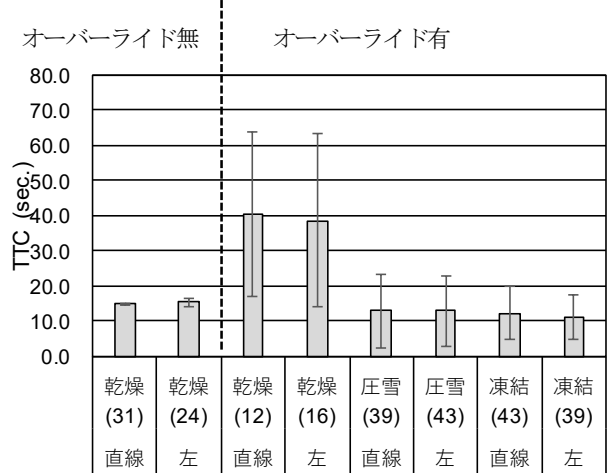
路面状態と速度がTTCに有意に影響していた。自車の減速度が小さくなるとすなわち路面のすべり抵抗値が小さくなるとオーバーライドするときのTTCは短くなった。また、速度が高くなるとオーバーライドするときのTTCは長くなった。これらの結果から、雪氷路面を含めてTTCにより先行車が減速したときの不安を評価できることを示せることが分かったと言える。

TTCを指標とすることから、冬期道路環境であってもACCをドライバは自分の運転感覚に近い状況で安全に使えるようになるかもしれない。一方、このためには、冬

(A) 80km/h



(B) 60km/h



(注1) 乾燥路面においてのみ、オーバーライド有とオーバーライド無に分けた。

(注2) ()内の数値は計測数

図-7 要因別・水準別のTTCの平均値と標準偏差

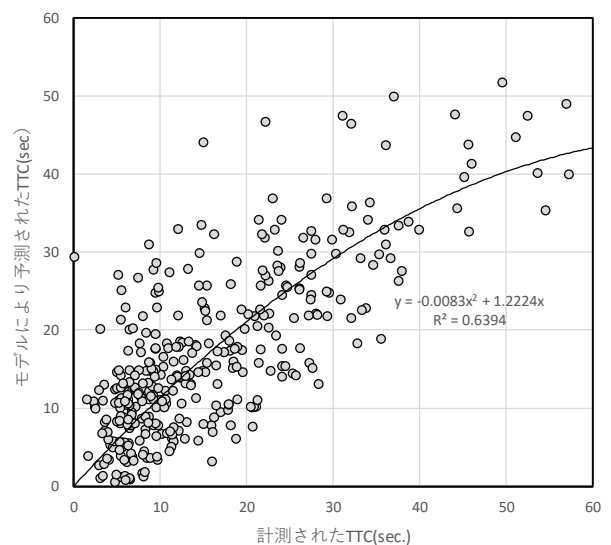


図-8 モデルにより予測されたTTCと計測されたTTCの散布図

期道路環境を事前を知ることが必要であり、路面状態などのモニタリングと情報配信を道路管理側で検討すべきと言える。これらの結果は仮想状況であり、実際の冬期道路環境において本研究と同様の計測を実施し、冬期道路環境とドライバの危険感及び安全性の関係を分析することが今後の課題となる。

謝辞：本研究は、国土交通省道路局による道路政策の質の向上に資する技術研究開発（令和元年度）の助成を受けたものです。関係者に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) oana Koglbauer, Jürgen Holzinger, Arno Eichberger, and Cornelia Lex, Drivers' Interaction with Adaptive Cruise Control on Dry and Snowy Roads with Various Tire-Road Grip Potentials, *Journal of Advanced Transportation* Volume 2017, Article ID 5496837, 2017.
- 2) Shuo Li, Phil Blythe1, Weihong Guo1, Anil Namdeo1, Investigation of older driver's take-over control performance in highly automated vehicles in adverse weather conditions, *IET Intelligent Transport Systems* 2018.
- 3) 萩原 亨, 杉谷 慧, 加藤 佑基, 遠藤 幹大, 大廣 智則, 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*, 2019年 50 巻 4 号 p. 1095-1101.
- 4) 加藤 佑基, 萩原 亨, 岡田 稔, 内藤 利幸, 宗広 一徳, 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*, 2019年 50 巻 4 号 p. 1120-1125.

(?)

DRIVER'S RISK-AVOIDING BEHAVIOR WHEN THE DRIVER USES ADAPTIVE CRUISE CONTROL ON THE EXPRESSWAY IN WINTER

Shogo KAWASHIMA, Shuhei WADA, Tomonori OHIRO, Sho TAKAHASHI, and Toru HAGIWARA

Many ongoing projects around the world are investigating how automated vehicles drive on snowy and icy roads. However, few reports have addressed the effects of slippery road conditions in winter on currently available adaptive cruise control (ACC) systems, especially on the driver's interaction with these systems. As a first step, understanding the effects of winter road conditions using ACC systems on driver's interaction must be investigated. The present study aims to clarify driver's risk-avoiding behavior when the drivers meet the risk incident at the expressway in winter using ACC systems. The purpose of this study is to clarify the driver's danger-avoidance driving behavior when facing a sudden deceleration of the preceding vehicle when using ACC in the winter road environment. We reproduced the Sasson Expressway in winter on a driving simulator and examined the effects of running speed (80km/h, 60km/h), road alignment (straight, left curve), and road surface conditions (dry, snowy, frozen) on sudden deceleration of the preceding vehicle in winter road environment from the driving behavior of 43 experimental participants. As a result, it was suggested that there is a possibility that the driving behavior of the driver can be evaluated by using TTC as an index.