

雪氷作業車後方の目安光線が 後続車両の追従安全性に及ぼす影響

頓部真大¹・浜岡秀勝²・鈴木雄³・岡本拓⁴・泉頭次⁵・宍戸堅二⁵・高木一誠⁶

¹学生会員 秋田大学 大学院理工学研究科土木環境工学コース (〒010-8502 秋田市手形学園町1番1号)

E-mail: m8019802@s.akita-u.ac.jp

²正会員 秋田大学教授 理工学部土木環境工学コース

³正会員 公益財団法人豊田都市交通研究所

⁴法人会員 東日本高速道路株式会社

⁵法人会員 株式会社ネクスコ・エンジニアリング東北

⁶正会員 積水樹脂株式会社

冬季の高速道路の雪氷作業では、作業車の無理な追い越しによる事故や、追従する車両の接触事故などの危険を伴う。そこで、事故対策として作業車後方に目安光線を導入する対策が挙げられる。この効果として、追越抑制と追従中の安全性向上が考えられる。

本研究では、目安光線の効果についてドライビングシミュレータを用いた実験から検証した。路面の状況や後続車両の接近速度を変更し、各状況下で効果も比較する。実験では、明るさと照射位置を変更した2種類の目安光線を設定し、目安光線なしの走行と比較した。アンケート調査より、目安光線によって後続車両ドライバーの走行しやすさや車間距離の把握が有意に向上した。加えて、苛立ちや追越抑制効果も確認できた。ドライバーの運転行動の分析から、作業車への接近時には、目安光線によって加速度の高い接近が減少した。また、作業車が増減速した場合にも、車間距離が短い走行では目安光線によって増減速への反応時間が短縮された。加えて、追従走行では、より安全な状態を維持しており、目安光線は車間距離が短い場合、特に効果的であると明らかになった。

Key Words : winter service vehicle, reference line, driver behavior, accident prevention, driving simulator

1. 研究背景と目的

積雪寒冷地の高速道路では、降雪や積雪によるスリップ事故等を未然に防ぐため、除雪や凍結防止剤の散布が実施される。これら雪氷作業は、交通安全の観点から重要である。作業車は、適切な速度で走行するが、雪氷作業中も一般車両の交通がある。雪氷作業中は一般車両と比較して低速の場合が多く、一般車両は作業車に追いつき一定時間追従する。しかし、その中には追従せず無理な追い越しをする車両も存在する。作業車後方には「追越禁止」の文字が表示されているが、作業中の安全性には課題がある。

一方で、積雪寒冷地の事故対策として、LEDと特殊レンズを組み合わせ、線状の光を照射する帯状ガイドライトがある。これは、積雪や吹雪等の気象条件によって、車道外側線が見えにくい場合においても、ドライバーの道路線形の認識を補助する灯具で、外側線上に目安とな

る光を照射する。先行研究¹⁾²⁾³⁾では、この外側線への目安光線の導入により、ドライバーの運転負担を軽減する効果が明らかとなっている。そこで、雪氷作業時の安全性向上の目的で、帯状ガイドライトを応用し、作業車の後方に目安光線を照射する事故対策が考えられる(図-1)。道路を横断方向に目安光線を照射することで、後続車両の追越抑制や接触事故防止、後続車両のドライバーの運転負担軽減などの効果が期待される。



図-1 目安光線を照射する雪氷作業車

しかし、作業車の後方に目安光線が照射された場合の安全性等の評価は実施されていない。そこで、本研究では、目安光線がどのような条件で、どの程度安全性を向上させるか、運転負担の軽減に効果があるか検証する。

雪氷作業時の作業車と一般車両の安全性について検討すると、接近の速度、路面の状況、追従中の車間距離、ドライバーの年齢、周辺車両の存在等、無数の状況が想定される。これらの諸条件において、目安光線の効果を検証する必要がある。しかし、実際の道路環境において、様々な条件での実験は困難であるため、ドライビングシミュレータ（以下、DS）を用いて実験を実施した。DSでは、積雪の有無、接近速度の違い、そして目安光線の条件を任意に設定できる。実験時のアンケート調査や、運転行動の結果から、目安光線なしと目安光線ありの結果を比較し、目安光線の効果を評価する。

2. 実験方法

(1) 実験環境

雪氷作業時の目安光線の効果を検討するため、積雪や目安光線の条件を変更しながらドライバーの運転行動を観測する実験を実施した。実際の高速道路において、積雪時にも高速で接近する車両を再現する実験などは危険を伴う。そこで、積雪状況などを任意に選択して、安全に実験可能なDSを用いて走行実験を実施した。

本研究では、目安光線の効果を検討するため、カーブや勾配の影響を除いて実験する。しかし、完全な直線道路では、ドライバーは開始時からハンドル操作を一切行う必要がなくなる。そこで、ドライバーが運転にも注意しつつ走行する目的で、開始時のみ非常に緩いカーブ（ $R=3000m$ 程度）を設け、以降は直線となる四車線の道路を作成した。

DSでは、気象条件も任意の状況に設定できる。目安光線は雪氷作業時を想定しているため、降雪する状態を再現した。フロントガラスに着雪し、晴れよりもわずかに前方がにじむ状況を再現した。また、LEDの照射による目安光線は、主に夜間において機能する。そこで、DSの時間設定は夜間にしたうえで、図-2のように実験室内にも遮光カーテンを用いて外光を遮断し、降雪時の夜間走行を再現した。

なお、実際の積雪寒冷地の高速道路を参考に、道路上に照明設備は設置せず、視線誘導機器として外側線にスノーポール、中央分離帯にデリニエータを設置した。周辺交通がある場合、ドライバーが他の車両の動きに影響を受け、加減速したり追い越す恐れがある。そこで、周辺交通は設定せず、作業車と実験車両のみの環境で実験を実施した。

(2) 目安光線の設定

本研究は、目安光線の有無による実験結果の違いから、目安光線の効果を検討する。目安光線はLEDを照射したものを想定している。目安光線は作業車の後端から離れている方が安全性が高まると考えられるが、光の減衰によって暗くなるデメリットもある。そこで、本実験では作業車後端から7mと15mの2種類の目安光線を設定した。これらの概要を表-1に示す。7mの目安光線は15mの目安光線と比較して、より明るく太い線となっている。7mと15mの2種類の目安光線に加え、目安光線OFFの状態の3パターンで検証する。

(3) 実験条件

3パターンの目安光線の他に、目安光線の効果を検討するにあたり、接近速度と路面状況を変更して実験を実施した。四車線高速道路の制限速度や実勢速度を考慮して、60km/hと80km/hの2種類の接近速度を設定した。

また、雪氷作業のうち、除雪作業時は積雪路面が想定され、凍結防止剤の散布では湿潤路面が想定される。路面の積雪状況によって、目安光線の見え方が変わり、後続車両を運転するドライバーの行動や運転負担に影響を及ぼす可能性がある。そこで、DS上で積雪状態の白路面と、湿潤状態の黒路面の2種類の路面を設定した。



図-2 夜間を再現した実験の様子

表-1 実験で設定した目安光線の概要

7m	15m	OFF

(4) 実験概要

実験概要を表-2 に示す。被験者 21 人に、12 回ずつ、合計 252 回の走行実験を行った。被験者は 20 代、30 代、40 代、50 代が 4 名ずつ、60 代以上が 5 名で、男性 13 名、女性 8 名である。1 回の走行実験は約 160 秒とした。

被験者が日常的に利用する自動車と DS の操作感とは異なる恐れがあるため、練習走行を実施した。ハンドルやアクセル操作等の練習として、目安光線なしの作業車の後方を追従走行する練習を実施した。

走行実験では、被験者に 60km/h または 80km/h の接近速度を伝え、運転に支障のない範囲での速度の維持を指示した。また、実験では作業車が見えない状態から走行を開始する。被験者が作業車を確認した後、任意のタイミングで減速し、作業車の後方を追従走行する説明をした。このとき、追い越しは禁止している。被験者の走行の仕方でも前後するが、おおよそ 60 秒間かけて接近し、100 秒間の追従走行を行うように実験のスタート位置を設定した。

本実験では、作業車の速度は基本的に 50km/h を基準とする。ただし、被験者の接近速度が 60km/h の場合、作業車との相対速度は 10km/h と小さくなる。このとき、作業車が見えない位置から走行開始すると、作業車に十分接近するまで時間を要する。そこで、実験開始直後の作業車は 30km/h で走行し、実験開始 40 秒以降は 50km/h で走行するよう設定した。これにより、接近速度 60km/h の場合にも、作業車が見えない位置から走行開始できる。

目安光線による車間距離の認識状況を定量的に判断するため、追従中に 2 回の作業車速度変化を設定した。このとき作業車は速度を 10km/h 変化させる。変化のパターンが一定であると、被験者の運転行動に影響を及ぼす恐れがあるため、2 パターンを設定した。作業車は 50km/h で走行し、その後 60km/h に加速した後に再び 50km/h に戻るパターンと、50km/h から 40km/h に減速した後に 50km/h に戻るパターンである。作業車の速度変化のパターンはランダムに割り当てた。また、作業車が途中で速度変化することを被験者には伝えずに実験を実施した。

走行ごとに変化する実験条件は目安光線の種別が 3 パターン、接近速度が 2 パターン、路面の色が 2 パターンの計 12 パターンである。全 12 回の走行実験での各条件の組み合わせを表-3 に示す。順序効果の影響を除くため、実験の順序は被験者ごとにランダムに変更した。

走行実験では、車間距離、速度、アクセル開度、ブレーキの踏み具合のデータを取得した。これらのデータより、被験者の運転行動を分析する。また、各走行実験終了時に、被験者の主観評価を確認する目的で、アンケート調査を実施した。目安光線の有無で、主観評価の結果を比較して、目安光線の有効性を検討する。

3. アンケート調査結果

(1) アンケート調査の概要

目安光線の効果の検討では、客観的な運転行動のデータの他に、ドライバーが感じた主観的な評価も重要である。そこで、実験では運転行動のデータに加え、1 回の走行毎にアンケート調査を実施した。1 人あたり 12 回のアンケート調査を行い、合計 252 回答を取得できた。質問の一例を表-4 に示す。質問は作業車への接近時の評価、作業車に追従中の評価、目安光線についての評価の 3 項目に分かれている。接近時と追従中の評価の結果を目安光線の有無で比較し、その効果を検討する。また、目安光線の評価については、目安光線ありの場合にのみ調査した。その結果より、7m と 15m の 2 種類の目安光線の比較し、どちらの目安光線が有効か検討する。

表-2 実験概要

実験場所	秋田大学 総合研究棟 5 階
実験日時	2020 年 1 月 14 日～17 日
被験者	21 名 (20～60 代以上、男性 13 名女性 8 名)
走行回数	一人あたりの実験回数 12 回、合計 252 回
走行時間	走行 1 回あたり約 160 秒

表-3 実験条件の組み合わせ

No.	目安光線	接近速度	路面
1	OFF	60km/h	白
2	OFF	80km/h	白
3	OFF	60km/h	黒
4	OFF	80km/h	黒
5	7m	60km/h	白
6	7m	80km/h	白
7	7m	60km/h	黒
8	7m	80km/h	黒
9	15m	60km/h	白
10	15m	80km/h	白
11	15m	60km/h	黒
12	15m	80km/h	黒

表-4 アンケート調査の質問の一例

項目	質問
接近	走行しやすかったですか
	距離感は分かりやすかったですか
追従	走行しやすかったですか
	距離感は分かりやすかったですか
	イライラしましたか
目安光線 の評価	追越したい気持ちになりましたか
	目安光線は見やすかったですか
	目安光線の距離はいかがでしたか

(2) 接近時の目安光線の効果

作業車へ接近している状況での目安光線の効果を検討する。夜間降雪環境下ではドライバーは運転操作に気を使う。加えて接近時には前方を走行する作業車にも注意する必要があり、ドライバーの運転負担は大きい。そこで、「走行しやすかった」か、5段階評価で調査した結果を図-3に示す。その結果、目安光線ありはOFFと比較して、走行しやすい傾向が確認できた。そこで、7mとOFF、15mとOFFについてWelchのt検定を実施すると、それぞれ有意水準1%で有意な差異があった。したがって、目安線には、後続車両のドライバーの運転負担を有意に低下させる効果がある。

また、接近時に適切な車間距離が認識できない場合、急ブレーキなどの危険な運転操作や作業車との追突事故の危険性が高まる。そのため、事故防止には作業車との車間距離を適切に認識することが重要である。そこで、「車間距離が分かりやすかった」か、5段階評価で調査した結果を図-4に示す。目安光線ありはOFFと比較して、車間距離が分かりやすいことが確認できた。これらは、有意水準1%の差異である。したがって、目安光線があることで、接近時の車間距離の認識しやすさ向上を確認できた。車間距離の適切な認識が、目安線は追突などの事故防止にも寄与すると考えられる。

加えて、本実験では、60km/hと80km/hの2種類の接近速度で実験を実施した。条件ごとに車間距離の分かりやすさを確認すると、接近速度80km/hの場合では15mよりも7mの評価が高かった。15mよりも7mの方が明るいいため、車間距離が離れた状態における目安光線の視認性の高さが影響している可能性がある。Welchのt検定の結果、7mと15mの差異については $p=0.13$ であり、高速接近時には、7mの方がより車間距離が分かりやすい傾向があると思われる。

(3) 追従中の目安光線の効果

作業車の後方を追従している状況での目安光線の効果を検討する。夜間積雪時に追突しないように追従し続けることは、一定の運転負担があると考えられる。接近時と同様に、「走行しやすかった」か、5段階評価で調査した結果を図-5に示す。目安光線ありはOFFと比較して、走行しやすい傾向があり、それぞれ有意水準1%で有意な差異があった。

また、車間距離の把握は事故防止に重要である。そこで、追従中に「車間距離が分かりやすかった」か、5段階評価で調査した結果を図-6に示す。目安光線ありはOFFと比較して、車間距離が分かりやすい傾向がある。これは有意水準1%で有意な差である。したがって、目安光線は追従中においても、ドライバーの運転負担を軽減し、車間距離の分かりやすさを向上させる効果がある。

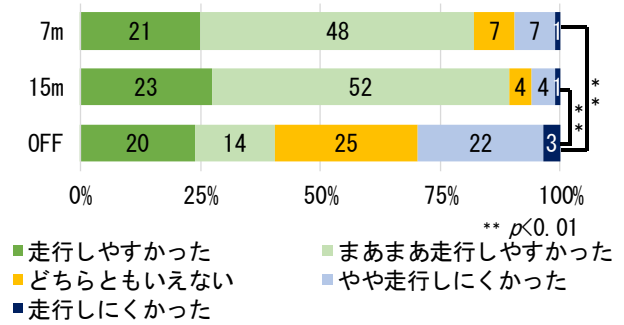


図-3 接近時の走行のしやすさ

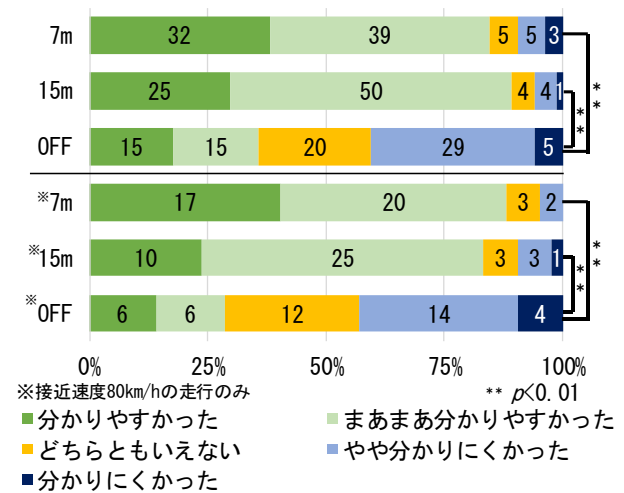


図-4 接近時の車間距離の分かりやすさ

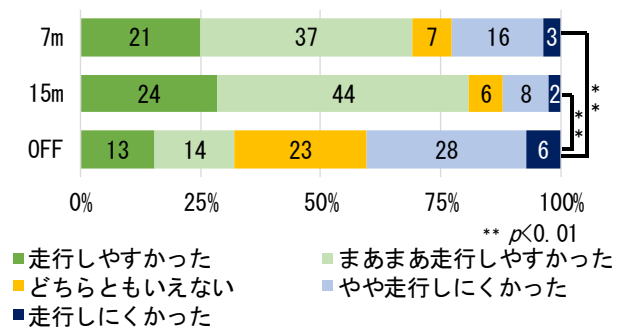


図-5 追従中の走行のしやすさ

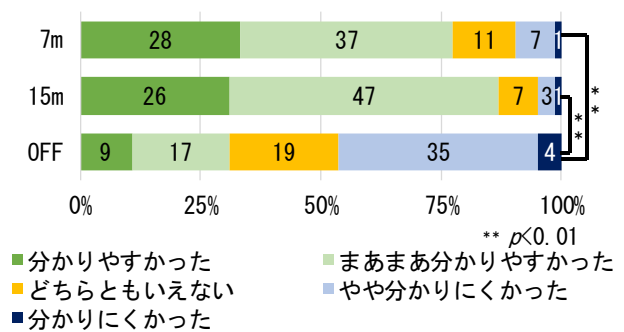


図-6 追従中の車間距離の分かりやすさ

雪氷作業中の作業車の追い越しは禁止されている。しかし、現状では作業車を追い越し一般車両が存在しており、事故に繋がりがかねない。そこで、目安光線を道路横断方向に照射することで、追い越しを抑制し、雪氷作業中の安全性向上が期待されている。そのため、追従走行中に「追い越したい気持ちになった」か、5段階評価で調査した結果を図-7に示す。目安光線ありでは追い越したい気持ちが減少している。これは有意水準 5%で有意な差である。したがって、目安光線は追従する後続車両に対し、追い越し抑制効果があるといえる。

追従走行は、ドライバーが任意の速度で走行できないため、苛立ちを感じやすい状況である。そこで、追従中に「イライラ」したか 5段階評価で調査した結果を図-8に示す。目安光線によって苛立ちが減少する傾向があり、7m と OFF の差は有意水準 5%の差異である。したがって、目安光線には苛立ち抑制の効果があるといえる。

(4) 目安光線の評価

目安光線があることで、接近や追従走行中のドライバーの運転負担が減少し、車間距離の認識しやすさが向上した。この他に、目安光線に期待できる効果の確認として、ドライバーの意識の変化が挙げられる。目安光線によって「安全に走行しようと思った」か、5段階で調査した結果を図-9に示す。9割以上の走行で、目安光線によって、安全に走行しようと感じたことが明らかとなった。そのため、目安光線にはドライバーの安全運転の意識を向上させる効果があるといえる。

また、作業車は回転灯を点灯させているが、悪天候の中では発見が遅れる恐れがある。発見が遅れると、急ブレーキなどの危険な運転行動や追突事故などに繋がりがかねない。本実験では、降雪のある状態で実験を実施したため、晴天時よりも作業車を認識が困難である。そこで、目安光線があることで「前方車を発見しやすかった」か、5段階評価で調査した結果を図-10に示す。9割を超える走行で、目安光線があることで作業車の発見が容易となったことが確認できた。したがって、目安光線を照射することで、ドライバーが作業車を認識しやすくなり、急ブレーキや追突事故の危険性が減少すると考えられる。

次に、7m と 15m の 2 種類の目安光線のうち、どちらが効果的な目安光線であるか明らかにする目的で、5段階評価での調査を比較する。7m は照射位置までの距離が短い、目安光線は 15m よりも明るい。15m は照射位置までの距離が長い、光の減衰によって暗くなってしまう。目安光線はドライバーに視覚的に機能する対策であるため、その見やすさは重要である。そこで、目安光線は「見やすかった」か、それぞれの主観評価の結果を図-11に示す。7m は 15m よりも見やすい傾向があり、これは有意水準 1%での差異であった。

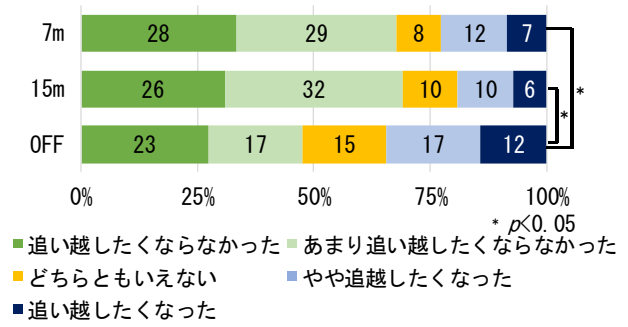


図-7 追従中の追い越しの気持ち

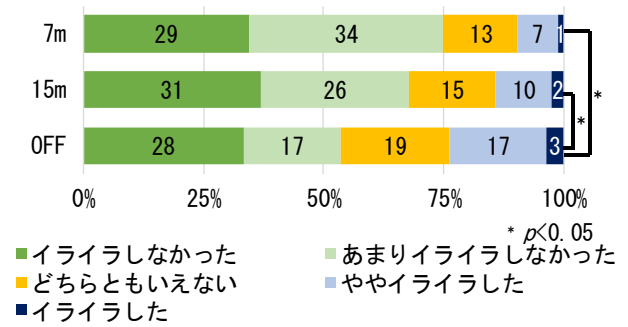


図-8 追従中の苛立ち

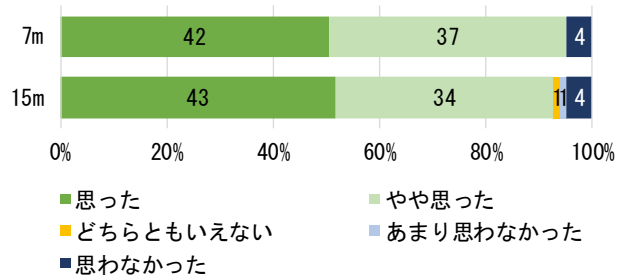


図-9 安全走行の意識状況

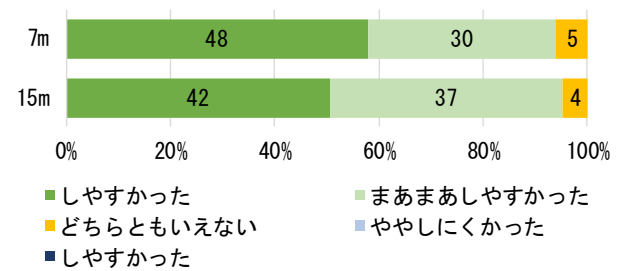


図-10 作業車の発見のしやすさの評価

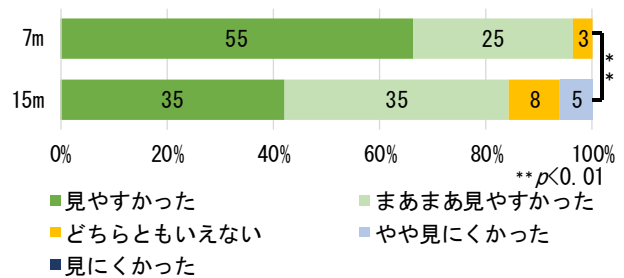


図-11 目安光線の見やすさの評価

目安光線の見やすさに関係する要因として、その照射位置が考えられる。本実験は、照射位置までの距離が 7m と 15m の 2 種類の目安光線を用いて実施した。その距離について、ドライバーの主観評価を調査した結果を図-12 に示す。「ちょうどいい」と答えた被験者は 50% を超えており、7m と 15m で有意な差異はない。ただし、15m は 7m よりも「ちょうどいい」の割合が高いことから、目安光線の照射位置は長距離が望ましい。

また、目安光線の見やすさには、明るさも大きく影響する。照射位置の違いから、7m は明るく、15m は暗い。そこで、明るさについて同様に調査した結果を図-13 に示す。7m は 15m よりもちょうどいいの割合が高く、この差は有意水準 1% の差異である。したがって、目安光線は、照射位置が長く、かつ明るいほうが望ましい。しかし、光の特性上照射位置を長くすると暗くなってしまふ。本実験の 7m と 15m の比較では、7m の方が有意に見やすい結果が得られた。そのため、実用化する場合、目安光線は照射位置よりも十分な明るさを確保することが重要と考えられる。

4. 目安光線の運転行動への影響

(1) 分析の概要

実験で用いた DS では、車間距離、速度、アクセルやブレーキの使用状況を取得した。本実験では、はじめに作業車が見えない状況で走行を開始し、作業車を発見すると任意のタイミングで減速して、作業車に追従する。追従中に、作業車は速度を 2 回変化させる。走行実験の一連の流れにおける、車間距離、速度、アクセル、ブレーキの値の推移の一例を図-14 に示す。

本実験は 3 種類の状況が含まれる。1 つ目は接近で、急減速すると危険であるため、緩やかに接近することが望ましい。2 つ目は追従であり、安全のために車間距離を一定程度確保したうえで、作業車と同じ速度での走行が望ましい。3 つ目は追従中の速度変化に対する反応である。速度変化はさらに減速への反応と、加速への反応の 2 種類に分けられる。作業車が減速をする状況において、素早く減速を認知し、被験者も減速を開始する必要がある。また、作業車が加速する状況においても、速度変化に対する素早い対応は、車間距離を適切に把握している結果である。

(2) 接近時の運転行動

作業車より高速で接近する場合、追突を防ぐため減速する必要がある。しかし、急減速は事故に繋がりがねず、これを防ぐ必要がある。そのため、緩やかに接近することが望ましい。そこで、接近の安全性を示す指標として

加速度を取得し比較する。本実験では、2 種類の接近速度 60km/h と 80km/h を設定した。このうち、追突や急減速の危険性が高く、減速する速度幅が大きい接近速度 80km/h のデータについて分析する。被験者は 80km/h から作業車と同等の 50km/h 付近に減速する。このとき、減速開始時や減速終了時の前後では、エンジンプレーキで減速する機会が多い。これらの区間を含む加速度を取得すると、ブレーキで急減速した後にエンジンプレーキを長時間使用した場合に加速度が低く算定されてしまう。そこで、被験者が 75km/h から 55km/h になるまでの加速度の絶対値を取得した。

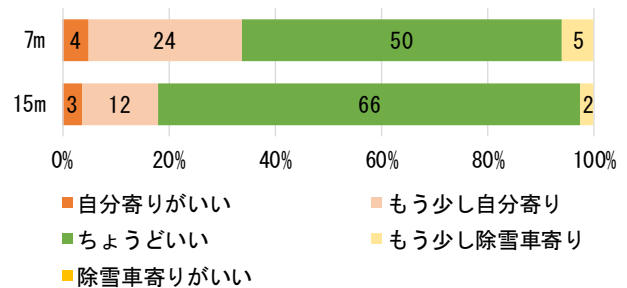


図-12 目安光線の照射位置の評価

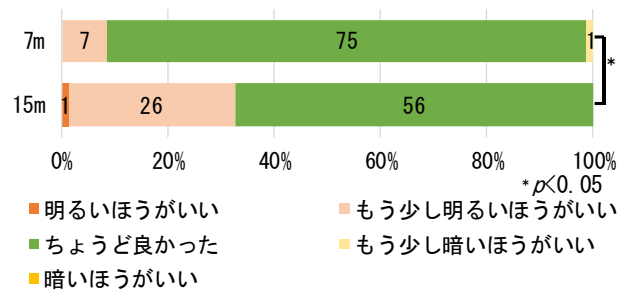


図-13 目安光線の明るさの評価

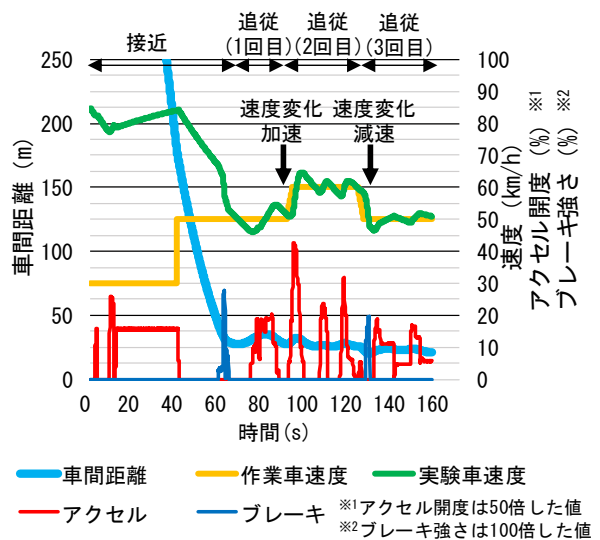


図-14 実験の流れと各種データの推移の一例

目安光線種別ごとに、加速度の絶対値を比較した結果を図-15に示す。目安光線ごと平均値を求めると、7mは 0.63m/s^2 、15mは 0.56m/s^2 、OFFは 0.64m/s^2 であった。15mはOFFよりも低いが、7mはOFFと同じ値である。これは、一部の外れ値の影響が大きい。そこで、目安光線ごとの四分位数を求めると、第三四分位において大きな違いがあった。それぞれ第三四分位数は、7mが 0.64m/s^2 、15mが 0.63m/s^2 であり、OFFが 0.95m/s^2 であり、目安光線があることで加速度の第三四分位数が大きく低下した。したがって、OFFでは加速度の大きい走行が多数あるが、目安光線がある場合は、急接近する走行が減少し、より加速度を抑えた緩やかな接近となる。

(3) 作業車減速時の運転行動

追従中に作業車が減速した場合、追突の恐れがあるため、作業車の速度変化を素早く認知する必要がある。そこで、作業車の減速に素早く対応できたか分析する。減速を認知した時に表れる運転行動として、アクセルを離してエンブレキを使用したり、ブレーキペダルを踏む動作が考えられる。このうち、アクセルを離してエンブレキを使用する減速は、追従走行中も行うものであり、その瞬間が作業車の減速に反応した瞬間とはいえない。そこで、作業車が減速開始した瞬間から、被験者がブレーキペダルを踏み始めるまでの時間を減速反応時間として定義し、分析の指標として用いる。

被験者は追従走行中に、作業車が減速する状況について、ブレーキの使用状況から分析する。しかし、作業車が減速する直前に、偶然車間距離の調節のため減速していた走行は、ブレーキを踏むタイミングが大きく異なる。減速直前の状態は、作業車に追従していた走行に制限する必要がある。そこで、作業車が減速する直前5秒間において、作業車速度との速度差が10%以内で推移している走行を分析の対象とする。そのうち、作業車の減速に対しブレーキを踏んで対応した126回の走行を対象に、減速反応時間を取得した。

目安光線種別の減速反応時間を図-16に示す。それぞれの平均値を比較すると、7mは7.3秒、15mは5.9秒、OFFは6.1秒であり、7mはOFFよりも反応時間が遅くなっている。ただし、車間距離が短ければ作業車の減速に気づきやすく、長い場合は気づきにくいため減速反応時間が遅くなると考えられる。

そこで、作業車が減速開始する直前の車間距離ごとに、減速反応時間を確認する必要がある。車間距離別の減速反応時間を図-17に示す。ここで、車間距離が30m未満の短い走行に着目すると、7mと15mの反応時間がOFFよりも短い。それぞれ中央値を求めると、7mは3.1秒、15mは3.1秒、OFFは3.7秒であり、目安光線があると反応時間が約0.6秒短縮されている。また、第一四分位に

は大きな違いがなく、第三四分位は中央値と同様の結果が表れている。そのため、OFFでは減速反応時間が比較的遅い走行が多数あるが、目安光線によってそれらの反応時間が短縮されたと考えられる。したがって、目安光線によって作業車との車間距離が分かりやすくなり、その結果減速反応時間が短縮されたといえる。

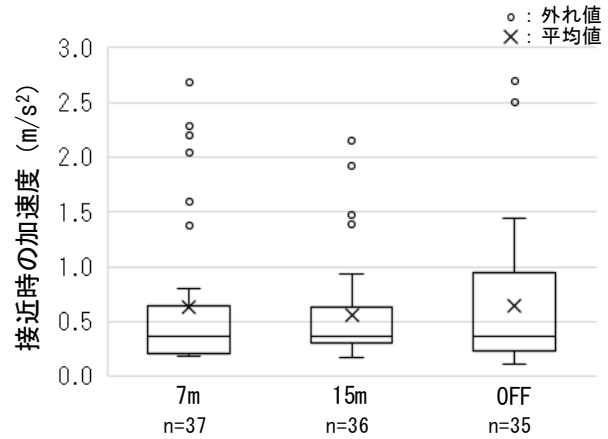


図-15 目安光線種別の接近時の加速度

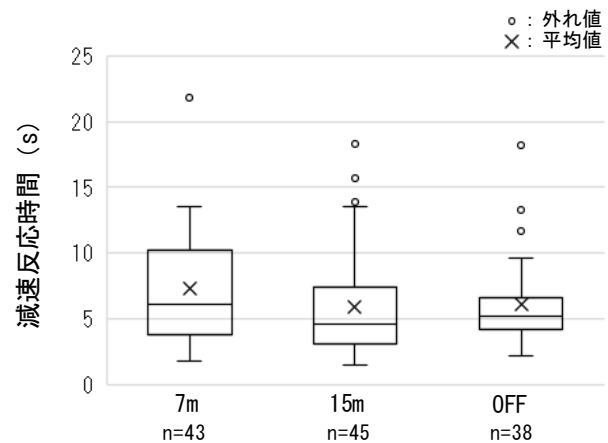


図-16 目安光線種別の減速反応時間

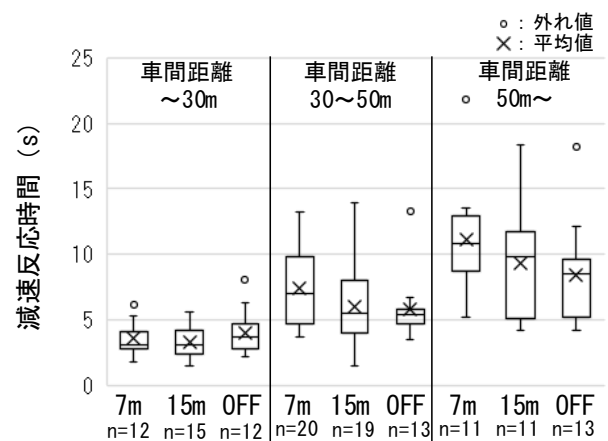


図-17 車間距離別の減速反応時間

(4) 作業車加速時の運転行動

追従中に作業車が加速した場合についても、減速と同様に反応時間を計測する。作業車が加速する場合は、それに対する反応が遅れても直接的な危険性はない。しかし、追従中は一定の車間距離の保持が望ましい。また、車間距離の変化を被験者が認知して初めて加速に繋がる。そのため、加速への反応時間が車間距離の把握状況の指標となる。被験者が作業車の加速を認知したとき、車間距離を一定に保つためにはアクセルを強く踏み加速する必要がある。しかし、追従中も速度維持のためアクセルを踏む必要があるため、アクセルを踏む瞬間が作業車の加速に反応した瞬間とは限らない。また、被験者によって、追従中のアクセル開度も異なる。そこで、各走行の追従中のアクセル開度と比較し、加速のために被験者がアクセルを強く踏む瞬間を抽出した。作業車が加速開始してから、被験者が加速のため強くアクセルを踏み始めるまでの時間を加速反応時間として定義し、分析の指標として用いる。

また、速度変化の瞬間に偶然車間距離の調整で加速していた場合などは、他の走行と正當に比較できない。加速直前の状態は、作業車に追従していた走行に制限する必要がある。そこで、作業車が減速する直前 5 秒間において、作業車速度との速度差が 10% 以内で推移している走行を分析の対象とする。そのうち、作業車加速後に、明確にアクセル開度が上昇した 144 回の走行を対象に、加速反応時間を取得した。

目安光線別の加速反応時間を図-18 に示す。目安光線種別ごとの平均値を比較すると、それぞれ 7m は 2.8 秒、15m は 2.4 秒、OFF は 3.2 秒であり、目安光線がある場合は、加速反応時間の短縮が確認できた。ただし、加速反応時間は、減速反応時間と同様に車間距離の影響を大きく受けると考えられる。

そこで、作業車加速直前の車間距離ごとに加速反応時間を求めた結果を図-19 に示す。その結果、車間距離の短い 30m 未満の走行において、目安光線がある場合、OFF よりも加速反応時間が短縮されていた。平均値で比較すると、7m は 1.7 秒、15m は 1.5 秒、OFF は 2.8 秒であり、約 1 秒の加速反応時間の短縮が確認できた。この結果より、目安光線は車間距離の短いドライバーに対して特に有効であり、速度変化への対応が早くなる。これは、ドライバーが目安光線によって車間距離の認識が向上した結果であると考えられる。

(5) 追従中の運転行動

追従中の目安光線の効果を検討する。1 回の走行実験で、作業車は速度を 2 回変化させるため、一定速度での追従は全 3 回存在する。しかし、加減速の反応時間が遅く、車間距離や速度が不安定で追従とは言えない走行も

あった。そのため、確実に追従しているサンプルを抽出する必要がある。そこで、3 つの条件を設定し、それを全て満たすものを追従状態のサンプルとして分析する。1 つ目の条件は、作業車との速度差 5% 以内でアクセルを踏むことである。アクセルを離すとエンジブレキによって減速してしまう。そのため、アクセルを踏むことは速度維持の意思の表れであるため、この瞬間を追従の開始点とする。2 つ目の条件は、追従時間が 10 秒以上の走行である。これは、追従時間が短いと、他のサンプルと比較し、追従の安定性等の確認する場合に適さないため、追従時間が短いものは除外する。3 つ目の条件は、追従中に作業車との速度差 10% 以内の状況が、その追従走行中の 75% 以上の占有である。これにより、車間距離の調整で不安定な走行を除外できる。これらの条件を満たす追従走行は、全 240 走行あった。目安光線別に確認すると、7m が 81 走行、15m が 81 走行、OFF が 78 走行であり、目安光線の種別による偏りはない。

追従中に前方車との車間距離が短い場合、接触事故の危険性が増す。そのため、追従中の車間距離はある程度

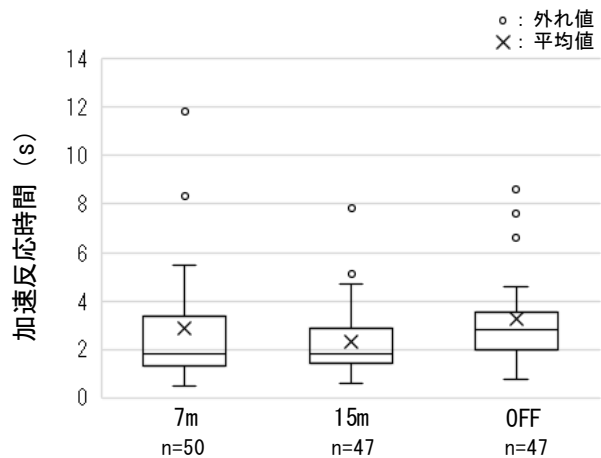


図-18 目安光線種別の加速反応時間

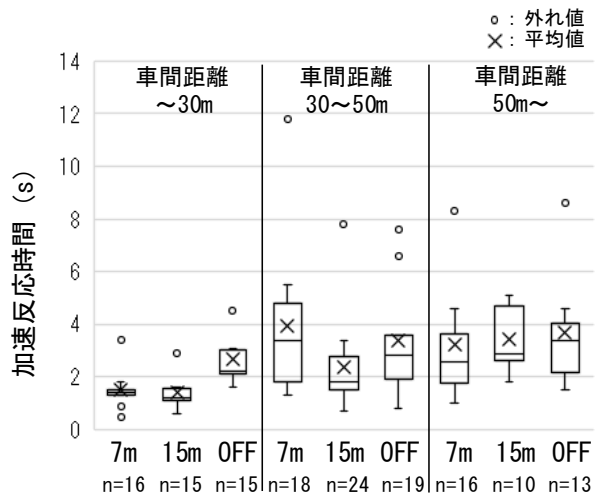


図-19 車間距離別の加速反応時間

確保する必要がある。そこで、目安光線種別ごとの追従中の車間距離を比較した結果を図-20 に示す。目安光線によって、追従中の車間距離は大きく変化していない。

また、追従中に車間距離が大きく変わると、後続車両のドライバーの運転負担が増加したり、作業車や後続車両と接触する危険性が高まる。そこで、追従中の車間距離の変動を比較する。車間距離が 1m 縮まる場合でも、車間距離が 10m の場合と 50m の場合では、その変動の割合は大きく異なる。そこで、車間距離を考慮した変動具合を確認するため、車間距離の変動係数を求めた結果を図-21 に示す。変動係数が低いほど、車間距離が安定し、後続車両との事故リスクも減らせると考えられる。しかし、目安光線によって、車間距離の変動係数に大きな違いは見られなかった。

追従中は車間距離や速度が変動する。車間距離が長い場合は、高い相対速度であっても問題ないが、車間距離が短い場合は危険である。そのため、速度と車間距離を考慮して安全性を評価する必要がある。その指標の一つとして、TTC がある。TTC は 2 台の車両が速度と進行方向が一定の状態で行くと仮定した場合において、接触するまでの余裕時間を示す指標である。しかし、追従中は作業車と被験者の速度がほぼ同じであるため、TTC での評価は適さない。そこで、PICUD⁹⁾を安全性を評価する指標として用いる。これは、前方車が急減速して停車した場合、ドライバーが認知・判断・操作を経て急停車した時の車間距離を示す。PICUD の値が低いと危険であり、0m 未満は追突することを示す。PICUD は次式(1)で示される。

$$PICUD = \frac{V_1^2}{-2a} + x - \left[V_2 \Delta t + \frac{V_2^2}{-2a} \right] \quad (1)$$

V_1 : 前方車両の速度 V_2 : 後続車両の速度
 a : 減速時の加速度 Δt : 反応遅れ時間
 x : 車間距離

PICUD を用いる場合、車両の減速時の加速度 a と、ドライバーがブレーキを踏むまでの反応遅れ時間 Δt を仮定する必要がある。本研究は、積雪寒冷地の雪氷作業を想定している。そこで、交通安全研究所の調査結果⁹⁾を参考に、減速時の加速度 a は $-3.0m/s^2$ と仮定した。

次に、ドライバーの反応遅れ時間 Δt を仮定する。追従中に作業車が加速・減速した場合の分析より、目安光線の有無によって加速・減速反応時間の差異が明らかとなった。そこで、目安光線の種別の差異を反応遅れ時間に反映させ、PICUD を求める。一般的に、反応遅れ時間は 1 秒とされている。しかし、実験で取得した減速反応時間は約 6 秒、加速反応時間は約 3 秒であり、一般的な値 1 秒と比較して遅い。これは、作業車が 10km/h 加減速した場合の反応時間であり、PICUD で想定する急停車と

状況が異なる。そこで、目安光線 OFF の加速・減速反応時間を一般的な反応遅れ時間である 1 秒と仮定し、目安光線ありの場合を加速・減速反応時間の OFF との比から算出して PICUD の計算に適用する。また、反応遅れ時間はドライバーに依存する指標であるため、被験者ごとに反応遅れ時間を算出する。

被験者別かつ目安光線別で値を算出するため、サンプルを細分化したうえで反応遅れ時間の代表値を決定する。しかし、1 被験者の加速反応時間のサンプル数は、各目安光線とも 4 サンプルずつであり、外れ値の影響が大きくなってしまふ。加えて、作業車の加速直前で追従できない等理由で、加速反応時間を 4 サンプル取得できない場合も多い。これは、減速反応時間についても同様である。そこで、外れ値の影響を減らすため、加速・減速反応時間それぞれ 3 サンプル以上取得できた 5 名の被験者について分析する。被験者ごとの OFF を 1 秒とした場合の加速反応時間と減速反応時間の平均値を反応遅れ時間とする。算出した各被験者の反応遅れ時間を表-5 に示す。被験者の年齢に偏りはなく、目安光線ありの反応遅れ時間もそれぞれ異なる。この反応遅れ時間 Δt を PICUD に代入し、追従中の PICUD を求める。

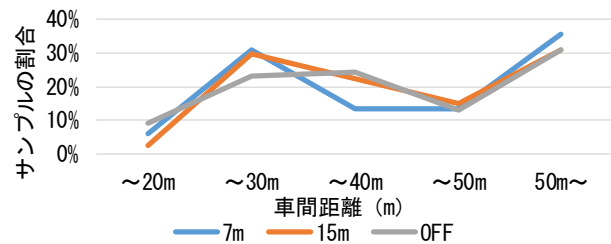


図-20 目安光線種別の追従中の車間距離

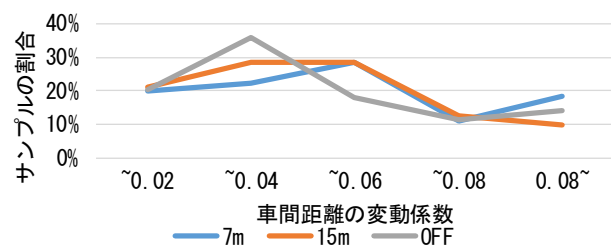


図-21 目安光線種別の追従中の車間距離の変動係数

表-5 被験者の年齢と反応遅れ時間 Δt

被験者	年齢	反応遅れ時間 Δt (s)		
		7m	15m	OFF
4	30代	0.7	0.6	1.0
6	30代	0.8	0.6	1.0
9	50代	1.0	0.7	1.0
15	40代	0.8	0.7	1.0
19	60代以上	0.9	1.0	1.0
平均		0.9	0.7	1.0

被験者ごとに異なる反応遅れ時間を適用し、算出した PICUD から目安光線の効果を検討する。ただし、PICUD は作業車速度や車間距離の影響を大きく受けるため、作業車速度別に PICUD の平均値を車間距離ごとにプロットした結果を図-22, 23, 24 に示す。同じ車間距離で比較すると、どの作業車速度においても、目安光線がある場合は OFF よりも PICUD が高いことが確認できる。また、目安光線ありの回帰直線は、OFF よりも高い PICUD を示している。したがって、どの車間距離においても、目安光線によって追従中の安全性が向上する効果が明らかとなった。

次に、回帰直線の傾きについて着目する。作業車速度と被験者の速度が完全に一致していると仮定すると、PICUD の式の中の変数は減速時の加速度 a 、反応遅れ時間 Δt 、車間距離 x である。分析では、全ての走行において減速時の加速度 a は 3.0km/s^2 と仮定して計算した。仮に、全ての走行において反応遅れ時間 Δt も同一の場合、PICUD の式の中の変数は車間距離 x のみとなり、PICUD は傾き 1.0 の車間距離の一次関数となる。

しかし、作業車速度 50km/h, 40km/h の目安光線ありの回帰直線の傾きは 1.0 より小さく、加えて OFF と比較しても小さい。これは、車間距離ごとの目安光線の効果の違いによるものと考えられる。加速・減速反応時間の分析より、車間距離が短い場合に目安光線の効果が確認できた。PICUD においても同様に、車間距離が比較的短い場合は、目安光線の効果が高いため、OFF と比較して PICUD が高くなる。それに対し、車間距離が比較的長い場合には、目安光線の効果が相対的に低下するため、PICUD は OFF と近い値を示す。したがって、車間距離によって目安光線の効果の程度が異なるため、目安光線ありの回帰直線の傾きが 1.0 よりも小さくなる。また、作業車速度が 60km/h の場合では、目安光線ありでも回帰直線の傾きは比較的 1.0 に近い。これは、作業車速度 50km/h, 40km/h と比較して、車間距離が長いいため、目安光線の効果は低下し、回帰直線の傾きが OFF と同様の 1.0 に近い値を示している。したがって、回帰直線の傾きから、目安光線は車間距離が短い場合に特に有効性が高いと明らかになった。

5. 運転行動とアンケート調査結果

本実験では、被験者や走行によって追従中の車間距離が異なっていた。そこで、運転行動のデータを分析した結果、加減速や追従中の目安光線の効果について、車間距離の影響も明らかとなった。そのため、車間距離が異なると、目安光線の主観評価も変化すると考えられる。そこで、追従中の車間距離の平均値ごとに、アンケート

調査結果を比較する。

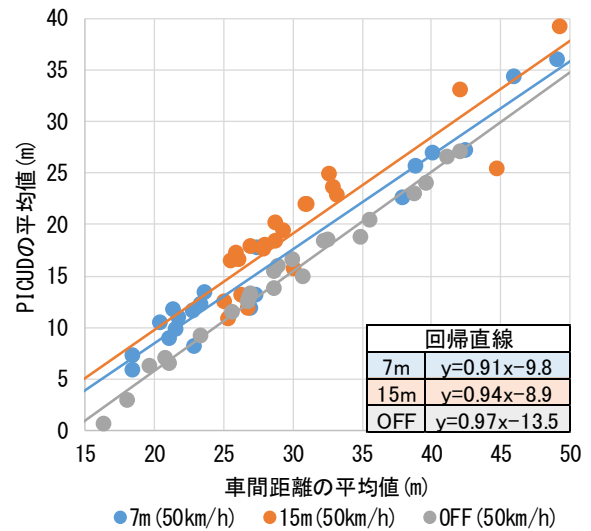


図-22 作業車 50km/h の追従の PICUD と車間距離

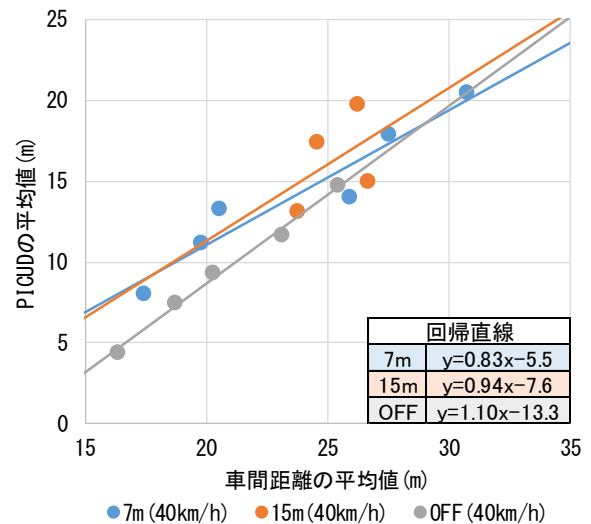


図-23 作業車 40km/h の追従の PICUD と車間距離

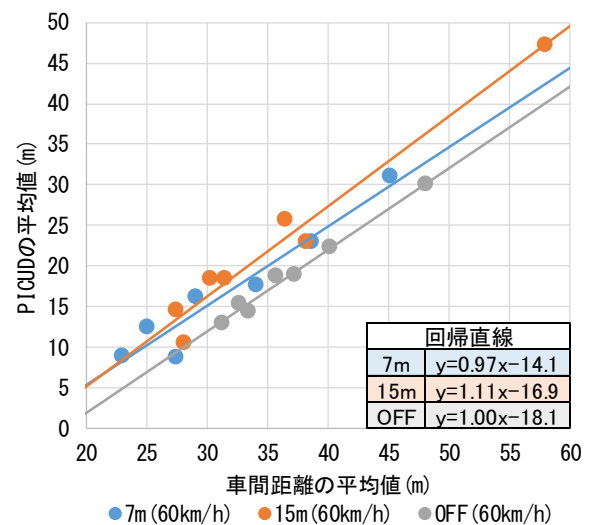


図-24 作業車 60km/h の追従の PICUD と車間距離

追従中はドライバーが任意の速度で走行できないため、苛立ちを感じる場合がある。そこで、「イライラ」したか、5段階評価を車間距離と目安光線種別ごとに比較した結果を図-25に示す。車間距離 30m 未満では、目安光線の有無によって苛立ちは変化しない。30m~50m, 50~70m の区間では、目安光線ありの場合、OFF と比べ苛立ちが減少しており、特に7mでは有意水準5%の差異が認められる。車間距離が十分長い70m 以上の場合、OFF でも苛立ちは感じておらず、目安光線の有無で苛立ちは変わらない。したがって、車間距離ある程度確保されている場合に、目安光線の苛立ち抑制効果がある。加えて、車間距離が比較的短い場合も含め、目安光線が苛立ちを増加させる恐れはない。

また、目安光線には追越抑制の効果も期待される。そこで、苛立ちと同様に「追い越したい気持ち」になったか、車間距離ごとに目安光線の効果を比較した結果を図-26に示す。車間距離 30m 未満と 30~50m では、目安光線によって追い越したい気持ちに変化が見られ、追越抑制効果が確認できる。特に車間距離 30m~50m の目安光線 7m では、OFF と比べ有意水準 5%の差異が認められる。車間距離が50m 以上の場合、目安光線の有無で追い越したい気持ちに明確な変化は見られない。したがって、車間距離がある程度短い場合に、目安光線の追越抑制効果がある。加えて、車間距離が長い場合も含め、目安光線があることで、追い越したくなる恐れはない。

次に、2種類の目安光線を比較する。目安光線は視覚的な対策であるため、その視認性は重要である。そこで目安光線が「見やすかった」か、5段階評価で調査した結果を車間距離別に図-27に示す。7mでは車間距離が長い場合も見やすさを維持、もしくは向上させているが、15mでは車間距離が長くなると「見やすかった」が減少し、「やや見にくかった」と感じる被験者も確認できた。車間距離が70m以上の7mと15mを比較すると、「見やすかった」には40%以上の差がある。実際の道路では、ドライバーによって車間距離が異なり、車間距離に応じて照射位置や明るさを変更することは難しい。目安光線の効果を発揮させるには、ドライバーに目安光線を視認してもらう必要がある。7mは15mよりも車間距離の長いドライバーにも有効であるため、より多くのドライバーに目安光線の効果が期待できる。加えて、車間距離が長い状態での視認性が高いことは、車間距離を比較的短く保つドライバーにとっても、接近時の早い段階で目安光線を視認できていたと考えられる。その結果、目安光線が暗い場合より早期に効果が発揮されるため、明るい目安光線は、暗い場合よりも車間距離が長く危険性が低い状態でもドライバーに目安光線の効果を提供できるといえる。

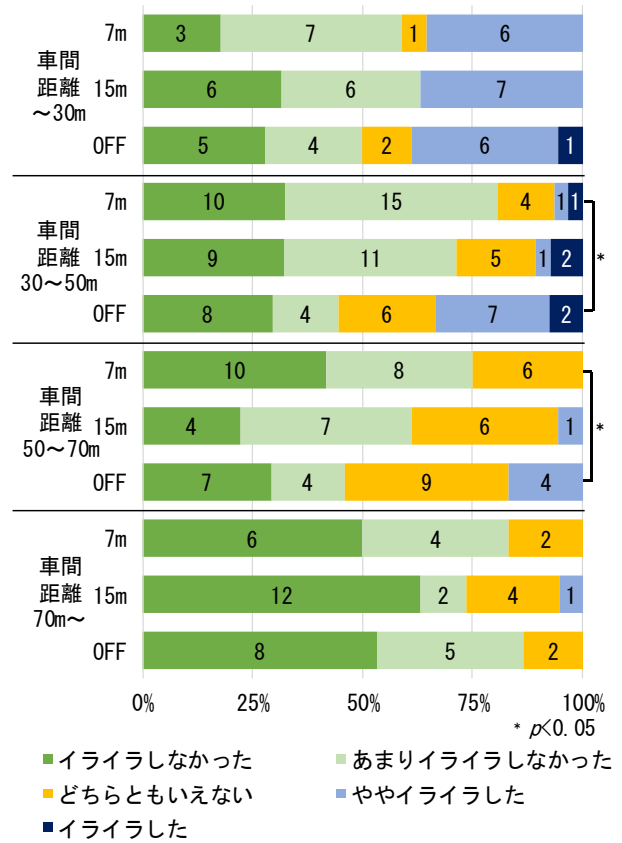


図-25 車間距離別の追従中の苛立ち

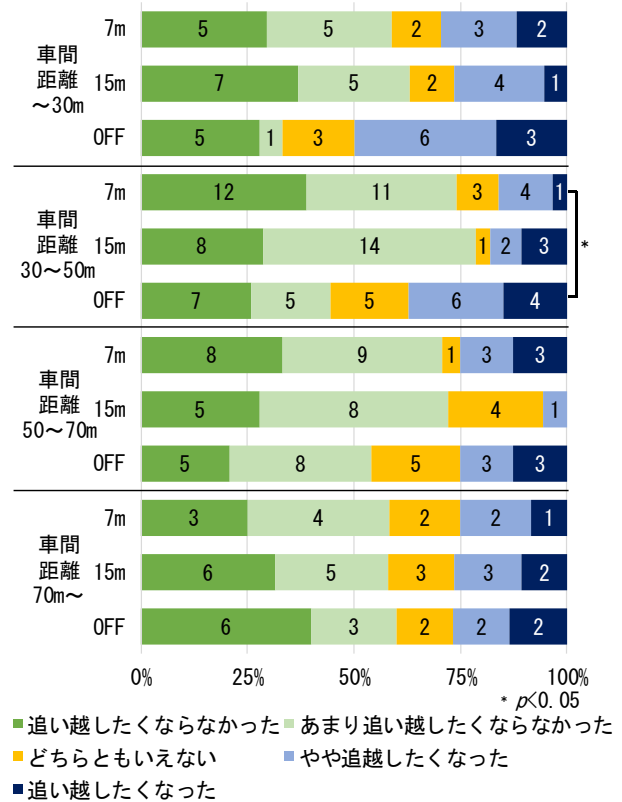


図-26 車間距離別の追従中の追い越したい気持ち

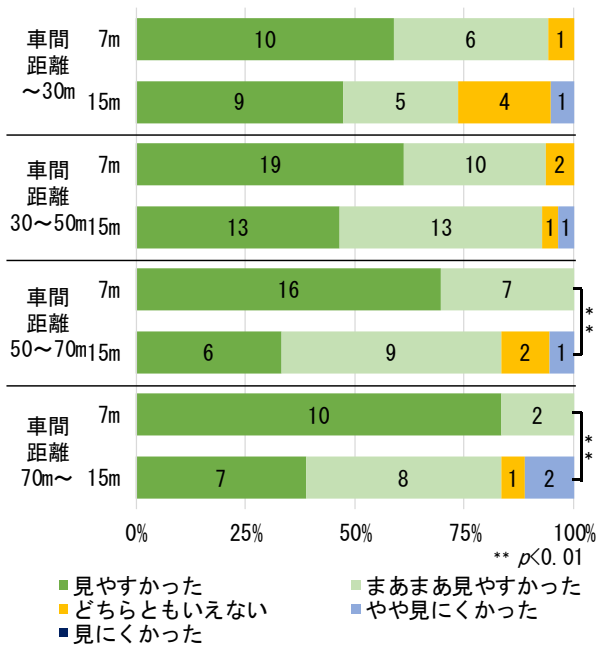


図-27 車間距離別の目安光線の見やすさ

6. まとめ

積雪寒冷地において、雪氷作業は必須であるが、作業時には周辺交通との事故が発生する危険性がある。そこで、本研究では LED と特殊レンズを用いて雪氷作業車後方に目安光線を照射する対策の効果を検討をした。LED の性質上、照射距離を延長すると暗くなる。そこで、車両後端から 7m の位置に照射した場合と 15m に照射した場合を DS で再現し、20 代から 60 代以上の 21 名のドライバーが参加して実験を実施した。実験と同時に行ったアンケート調査と、DS で取得したドライバーの運転行動データから、目安光線の有効性を明らかにした。

アンケート調査の結果より、作業車への接近時、追従中ともに、目安光線によって有意に走行しやすく、車間距離の認識が容易になる効果が確認できた。また、追越したい気持ちも減少しており、追従中の苛立ちも目安光線の明るい 7m において有意に減少した。加えて、目安光線があることで、安全走行の意識が向上し、作業車の認識性の向上も明らかとなった。

7m と 15m を比較すると、明るさは 7m の方が「ちょうどよい」の割合が高く、照射位置は 15m の方が「ちょうどよい」の割合が高かった。したがって、目安光線は明るく、遠距離の照射が望ましい。しかし、LED の特性上、明るさと照射位置の両立は難しい。ただし、目安光線の見やすさを比較すると、7m が 15m よりも優位に見やすい。そのため、現実的に目安光線の視認性を向上させるには、明るさを確保することが重要であると考えられる。

運転行動のデータより、接近、作業車の加減速への対応、追従中の安全性について分析した。作業車へ接近す

るとき、急減速すると接触などの事故の危険性が上昇する。そこで、加速度に着目して分析した結果、目安光線がある場合は、OFF と比較して加速度の高い走行が減少した。したがって、目安光線があると、接近時の急減速を抑制でき、事故対策として有効であると考えられる。

次に、作業車が減速したときの反応時間をドライバーのブレーキ操作から分析した。その結果、車間距離が短い場合、OFF と比べて反応時間が約 0.6 秒短縮された。また、作業車の加速への反応時間においても、ドライバーのアクセル操作から分析した。その結果、減速の場合と同様に、車間距離が短い走行では反応時間が約 1 秒短縮された。これらは、目安光線によって、車間距離の把握が容易になった結果、加減速に素早く対応できるようになったと考えられる。したがって、作業車の速度変化時の運転行動から、目安光線によって車間距離の把握が容易になり、安全性の向上が確認できた。

加えて、追従中の運転行動について、車間距離と速度を考慮した安全性の指標として PICUD を用いて分析した。ドライバーが認知・判断・操作に要する反応遅れ時間は、ドライバーや目安光線ごとに異なると考えられる。そこで、作業車の加減速への反応時間から、被験者別かつ目安光線種別ごとの反応遅れ時間を算出して PICUD を求めた。その結果、7m と 15m はともに OFF よりも PICUD が高い傾向にあり、目安光線による追従中の安全性向上が確認できた。また、その回帰直線の傾きから、車間距離が短い場合は、目安光線がより効果的であると明らかになった。

最後に、運転行動のデータを参考に、追従中の車間距離別にアンケート調査結果を確認した。その結果、車間距離によって苛立ち抑制や追越抑制効果の程度は異なっていた。また、効果が低い車間距離においても、目安光線によって苛立ちや追い越したい気持ちが増加することはない。さらに、目安光線の見やすさを車間距離別で確認すると、明るい 7m はどの車間距離でも見やすい傾向にあるが、15m は車間距離が長くなるほど見やすさが低下した。車間距離 50m 以上では、7m と 15m の見えやすさの違いは有意な差異であった。

以上の結果より、DS という限られた条件下ではあるが、ドライバーの運転負担の低減、車間距離の認識のしやすさや、危険な運転の抑制、安全性の向上などの目安光線の有効性が、主観評価と運転行動の両側面から明らかとなった。加えて、車間距離に着目すると、車間距離が比較的短い場合において、目安光線はより効果的であると確認できた。

本実験では目安光線の有無以外の要因を減らすため、勾配のない直線の道路で実験を行った。しかし、積雪寒冷地の道路には山間部も多く、本実験の条件より運転の難しい状況も予想される。山間部の夜間降雪時など、一

般に運転の難しい状況においても目安光線が有効か検討する必要がある。また、実験は追い越しを禁止して実施した。そのため、アンケート調査より、追従中の追越抑制効果は確認できたが、接近してきた車両に対し、追越抑制効果がどの程度期待できるか、運転行動からは明らかにできていない。実際の道路において、どのような車両に、どのような環境で追い越し抑制効果があるか、検証する必要がある。

参考文献

- 1) 萩原, 川村, 佐々木, 高木: 帯状ガイドライトの設置がドライバのメンタルワークロードに与える効果について, 交通工学論文集, 第1巻第2号, pp.B_10-B-17, 2015.2.
- 2) 佐々木, 片岡, 渋谷, 高木: 帯状ガイドライト装置の開発, 第30回道路会議, 論文番号: 1048, 2013.10.
- 3) 国村, 高木, 萩原, 佐藤, 佐々木: 帯状ガイドライトにより照射される線状反射光の視認性評価, 交通工学論文集, 第3巻第2号, pp.B_36-B42, 2017.2.
- 4) 宇野, 飯田, 安原, 菅沼: 一般道織込み部における客観的コンフリクト分析と速度調整モデルの構築, 土木計画学研究・論文集, Vol.20No4, pp.989-996, 2003.9.
- 5) 飯田, 日暮, 高橋, Jian, 山下: 高速道路の工事規制始端部における規制材配置と車両挙動との関連性分析, 土木計画学研究・論文集, Vol.27No.5, pp.983-990, 2010.9.
- 6) 独立行政法人交通安全環境研究所: 平成 26 年度国土交通省受託調査「雪道走行時の不安全挙動」につながるおそれがあるタイヤの不適切使用に関する調査, https://www.mlit.go.jp/jidosha/carinf/rcf/common/data/201501_report.pdf, 2015.1. (閲覧: 2020 年 10 月 1 日)

(?受付)