

講演 8. 市街地走行中に危険場面に遭遇した場合の人間ドライバの回避行動に関する実験的考察

自動車安全研究部 ※児島 亨 真鍋 裕輝 北田 幸一

1. まえがき

国土交通省が主宰する ASV (先進安全自動車) 推進計画では、1991 年から 30 年以上にわたり、産学官の連携によって交通事故削減のため、さまざまな取組が行われてきた。第 7 期 ASV 推進計画 (2021 年度～2025 年度) (以下、ASV7) では「自動運転の高度化に向けた更なる推進」を基本テーマとした検討が行われている¹⁾。具体的な検討項目の 1 つに、「自動運転車が備えるべき安全の範囲・水準の探索のための考察」がある。

ASV7 で「自動運転車が備えるべき安全の範囲・水準の探索のための考察」の具体的な検討を行うワーキンググループ (国内自動車メーカー、関係省庁、法律専門家、研究機関等の代表者で構成。以下、WG) において、2025～2030 年に実用化が予想され、他の道路利用者との混合交通の形で一般道を走行する自動運転車を想定し、自動運転車が事故を回避することが困難であると考えられる場面を整理した。

自動運転車が事故を回避することが困難であると考えられる場面に人間ドライバ (以下、ドライバ) が遭遇した場合の回避行動について分析することにより、上記の検討の足掛かりとするため、整理した場面の中からいくつかの場面を選定し、ドライビングシミュレータ (以下、DS) 実験を行うこととした。以下、実験内容について報告する。

2. 実験方法

2. 1. 実験場面

本研究では、2025～2030 年に実用化が予想される一般道を走行する自動運転車を想定し、自動運転車にとっては危険事象の発生を予見し事故を回避することが困難であると考えられるが、危険予知能力が比較的優れたドライバの場合には、直前の周辺情報から危険事象の発生を予見し事故を回避することが可能であると予想される危険場面を実験の対象とした。本来であれば実交通環境において該当する危険場面を幅広く抽出し、網羅的に実験を行うことが望ましいが、

実験の効率等も考慮し、本研究では以下の 3 つの場面 (場面 1～場面 3) を優先して実験を行うこととした。

2. 1. 1. 場面 1

図 1 に場面 1 の概要を示す。本場面では、実験参加者が運転する車両 (以下、自車) が片側 1 車線の単路を走行中、対向車線のバス停にバスが停車する。自車の左前方の歩道上には自車と同方向に 1 名の歩行者が歩行している。同歩行者はバスに乗車すべく小走りを開始した後、方向転換して自車の直前を横断する。ドライバは衝突回避のための操作を行う。

本場面では、自動運転車の場合、歩行者が小走りする様子から、直後にバスに向かって横断することを予測することは困難であると考えられる。一方、ドライバの場合には、バスの停車と歩行者が小走りする様子から、急な横断を予測して速度を落とす等のリスク回避行動を行う可能性も考えられる。

本場面における実験パラメータは図 1 の表中に示す通りである。道路の制限速度は 40km/h、歩行者が歩いている時の速度 (図中 V_{P1}) は 5km/h、小走りしている時の速度 (図中 V_{P2}) は 10km/h、歩行者が小走りを開始するタイミングは自車と歩行者の相対距離 (図中 X_1) が 33m となった時点、歩行者が横断を開始するタイミングは自車と歩行者の相対距離 (図中 X_2) が 11m となった時点とした。自車の速度が 40km/h の場合、歩行者が小走りするタイミングを衝

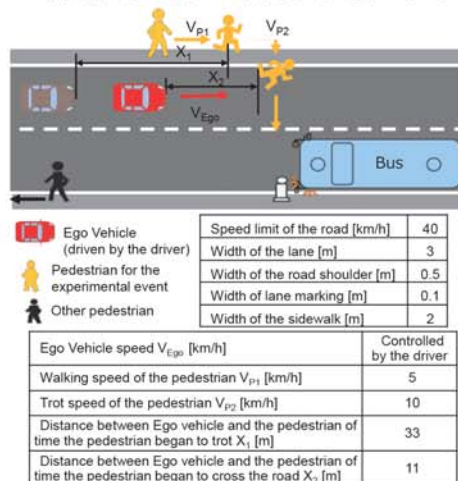


Fig.1 Abstract of experimental scene 1

突予測時間 (Time To Collision、以下、TTC) で表すと $TTC=3$ 秒、横断を開始するタイミングは $TTC=1$ 秒に相当する。また、小走りしている時間は約 2.6 秒となる。本場面では、歩行者が横断を開始するまでの間に自車の速度を低下させる等のリスク回避行動を行わなかった場合には、衝突の回避が困難な設定とした。

2. 1. 2. 場面 2

図 2 に場面 2 の概要を示す。本場面では、自車は片側 1 車線の優先道路を走行中、信号の無い交差点に接近する。同交差点は自車から見て左側が生垣となっており、見通しが悪くなっている。生垣の陰から 1 台の自転車が接近し、一旦停止することなく自車の直前を横断する。ドライバは衝突回避のための操作を行う。接近する間の自転車は生垣に隠れているが、乗員の頭部は視認可能である。図 3 に生垣の上から自転車乗員の頭部が見えている時 (図中左) 及び自転車の前輪が見え始めた時点 (図中右) のスクリーン画像の例を示す。

本場面では、自動運転車の場合、自転車乗員の頭部が移動する様子を認識し、自転車が横断することを予測することは困難であると考えられる。一方、ドライバの場合には、自転車乗員の頭部が移動の様子から、自転車の横断を予測して、速度を落とす等のリスク回避行動を行う可能性も考えられる。

本場面における実験パラメータは図 2 の表中に示す通りである。道路の制限速度は 40km/h とした。自転車の速度は 15km/h を基本とするが、自車が進行する道路の車道との境界線に進入するまでの間は自車速度 (表中 V_{Ego}) に係数 (表中 α 、 $\alpha=15/40$) を乗じた値とし、自車の速度が変動した場合でも、自転車が

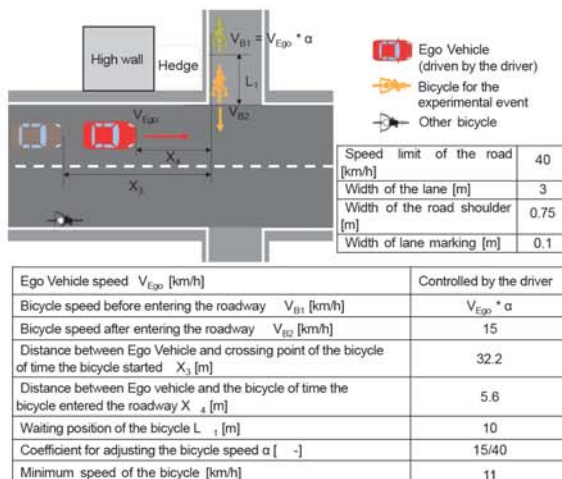


Fig.2 Abstract of experimental scene 2



Fig.3 Example of the screen image when the head of the bicycle rider was seen from a hedge

車道との境界線に到達した時点の自車との相対距離 (図中 X_4) がほぼ同じ値となるようにした。但し、自転車の速度には下限値を設定し、自車の速度が約 30km/h 以下となった場合には、自転車は 11km/h で走行し、 X_4 がより大きくなる設定とした。また、自転車は車道との境界線から 10m 下がった位置に待機しており (待機している間はドライバから視認不可)、自車が自転車の横断ラインから所定距離 (図中 X_3) に到達した時点で発進し、自転車が 15km/h で走行した場合には、2.4 秒後に車道との境界線に到達する設定とした。上記 X_4 は 5.6m (自車の速度が 40km/h の場合、 $TTC=0.5$ 秒相当) とし、自転車が車道との境界線に到達するまでの間に自車の速度を低下させる等のリスク回避行動を行わなかった場合には、衝突の回避が困難な設定とした。

2. 1. 3. 場面 3

図 4 に場面 3 の概要を示す。本場面では、自車は片側 1 車線の単路を走行中、前方の駐車車両を避けるため、対向車線へ進入する。自車の前方を走行中の自転車も駐車車両を避けるため、速度を落とすことなく対向車線側へ横移動する。ドライバは衝突回避のための操作を行う。

本場面では、自動運転車の場合、駐車車両を避けるために対向車線へ進入しようとしている間に、前方の自転車が横移動して自車の直前に進入することを予測することは困難であると考えられる。一方、ドライバの場合には、自転車が駐車車両を避けるため横移動することを予測して、自転車の後方を追従する等のリスク回避行動を行う可能性も考えられる。

本場面における実験パラメータは図 4 の表中に示す通りである。道路の制限速度は 40km/h とした。自転車の速度は 15km/h を基本とするが、自転車が横移動を開始するまでの間は自車速度 (表中 V_{Ego}) に係数 (表中 β 、 $\beta=15/40$) を乗じた値とし、自車の速度が変動した場合でも、自転車が横移動を開始した時点の自車との相対距離 (図中 X_5) がほぼ同じ値となるようにした。但し、自転車の速度には下限値を設定し、自車

の速度が約 30km/h 以下となった場合には、自転車は 11km/h で走行し、 X_5 がより大きくなる設定とした。また、自転車は駐車車両後端から 126.5m の位置に待機しており、自車との相対距離が所定値 (図中 L_3) に到達した時点で発進し、駐車車両後端から 12.5m に到達した時点 (15km/h で走行した場合、TTC=3 秒相当) で横移動を開始する設定とした。横移動により、自転車は対向車線に 0.4m 進入する設定とした。上記 X_5 は 10.4m (自車が 40km/h、自転車が 15km/h で走行した場合、TTC=1.5 秒相当) とし、自転車が横移動を開始するまでの間に自車の速度を低下させる等のリスク回避行動を行わなかった場合には、衝突の回避が困難な設定とした。

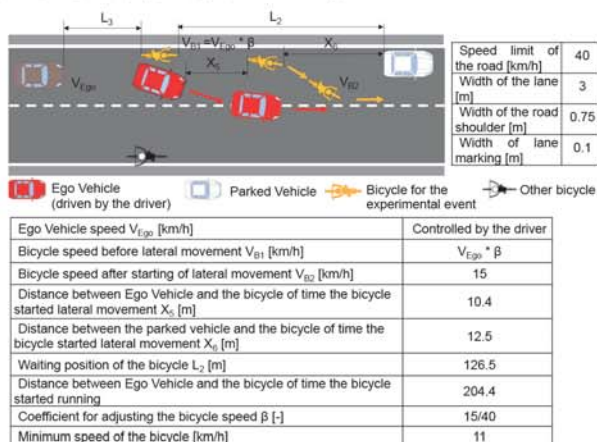


Fig.4 Abstract of experimental scene 3

2. 2. その他の実験条件

実験に使用した道路マップは、2.5km 四方のエリアを囲む外周道路の内側に、縦横 500m 間隔で格子状に道路を配備したものである。道路の両側には建物等を配置し、市街地を模擬している。場面 1~場面 3 の危険事象が発生する地点は別の場所とし、走行ルートも変えた。各場面において、走行を開始してから危険事象発生地点までの走行距離は 2~3km とした。

実験参加者は場面 1~場面 3 の全てに参加した (実験参加者内計画)。試行回数は各場面 1 回とし、実験の順序に偏りが生じないように配慮した。また、危険事象が発生しないダミー実験走行を各実験参加者に対し 15 回行い、危険事象が発生する実験走行が連続しないように配慮した。

2. 3. 実験に使用した DS

図 5 に実験に使用した DS の外観の写真を示す。本 DS は小型乗用車の車体を使用し、運転席及び操作系に関しては実車と同様である。6 軸アクチュエータと前後並進装置を組合せた動揺装置により、ドライバは

車両の運動 (加速度等) を体感可能である。また、映像描画用スクリーンに 55 インチの EL パネル 17 枚を全周に配置することにより、水平方向の視野角は 360 度確保され、より解像度の高い画像を描画することが可能である。



Fig.5 Driving simulator used for the experimental test

2. 4. 実験参加者の構成及び手続き

実験参加者は運転歴 5 年以上で日常的に運転を行う 30 代~50 代の一般ドライバ 20 名 (男性 10 名、女性 10 名) とした。実験参加者に対し、書面と口頭で実験内容、注意事項等について説明した後に、実験参加者の意思により同意書へ署名してもらった。また、本実験は独立行政法人自動車技術総合機構 交通安全環境研究所の「人間を対象とする実験に関する倫理規定」に基づき事前承認を得た後に実施した。

実験前の説明では、走行する道路が一般道であること、交差点の右左折に関する音声案内が行われた場合は指示に従って右左折を行うこと、道路上に制限速度の標識があること、一定の速度で走行することが可能な状況では、概ね制限速度程度で走行すること、走行中に危険であると判断した場合には、操舵・加速・減速のいかなる手段を用いて回避しても問題無いこと等を教示した。説明の後、DS に乗車して練習走行を行った。練習走行は原則 2 回とし、1 回目は直線道路で加速、減速及び操舵を繰り返し、実験参加者に DS の操作や車両の挙動を習熟してもらった。2 回目は交差点の右左折や一時停止を行い、実験走行と類似したルートを走行してもらった。

練習走行によって DS の運転が問題無く行われていることを実験担当者が確認するとともに、実験参加者にも問題無い旨を確認した時点で練習走行を終了し、実験を開始した。

3. 実験結果及び考察

3. 1. 場面 1

図 6 は場面 1 において、実験参加者の回避行動の割合を示したものである。凡例中の括弧内に衝突回避または衝突した件数を示している。本場面では実験参加

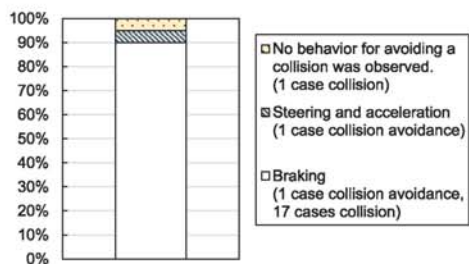


Fig.6 Rate of driving behavior for avoiding a collision (Scene 1)

者の90% (18例) がブレーキ操作による回避行動を行い、そのうちの17例は衝突した。ブレーキ操作以外の2例のうち、1例は回避操作なし(衝突)、他の1例は右方向へ操舵しながら加速(衝突回避)であった。本場面では全体の90%が衝突した。

図7はブレーキ操作によって衝突回避を試みた18名を対象に、横軸に歩行者が横断を開始した時点からブレーキ操作を開始するまでの時間(以下、ブレーキ反応時間)を、縦軸に最大減速度をプロットした結果を示す。最大減速度のプロットには、衝突後に最大値に至った場合も含まれる。また、図中、横軸と縦軸に引かれた破線はブレーキ反応時間と最大減速度の中央値を表している。ブレーキ反応時間は約0.6秒〜約1.2秒の間に分布(中央値は0.92秒)している。衝突回避した1名は0.92秒であり、中央値と同値であった。

ドライバの反応時間に関して言及した文献の例として、警察庁の『自動運転の公道実証実験に係る道路使用許可基準』²⁾では、ドライバが危険を感じてからブレーキを踏み、ブレーキが効き始めるまでの時間(空走時間)を0.75秒と想定している。本場面のブレーキ反応時間の中央値は、これらの値よりもやや長い値となっていることから、多くの実験参加者にとって、歩行者の急な横断を認識するまでにやや時間を要したものと考えられる。

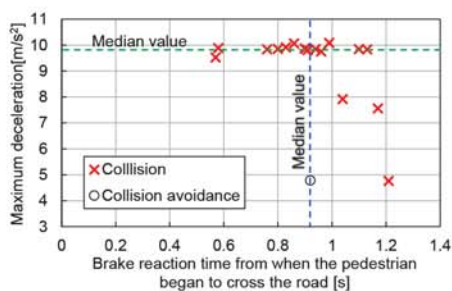


Fig.7 Relation between brake reaction time and maximum deceleration (Scene 1)

一方、最大減速度に関しては約 5m/s^2 〜約 10m/s^2 の間に分布(中央値は 9.8m/s^2)している。衝突回避した1名は 4.8m/s^2 であり、中央値の半分程度であった。衝突したケースの多くは約 8m/s^2 〜約 10m/s^2 であり、多くの実験参加者は非常に強いブレーキ操作を行っていたことが分かった。

図8は歩行者が横断を開始した時点の自車の速度(全実験参加者)を箱ひげ図で表したものである。

歩行者が横断を開始した時点の自車の速度は、約 32km/h (25%ile値)〜約 39km/h (75%ile値)に分布(中央値は約 37km/h)しており、制限速度よりも若干低かった。ブレーキ操作で衝突を回避した1例(図中赤丸)については約 15km/h であり、衝突したケースよりも明らかに低い値であることから、ドライバーは危険事象を予測して意図的に速度を低下させたものと考えられる。なお、本実験参加者の速度の時系列データを確認したところ、歩行者が小走りを開始する20秒程度前から緩やかに減速していたことから、小走り開始が速度低下の直接的な要因ではなかった。一方、上記以外の結果については、図7のブレーキ反応時間の結果と合わせて考えると、歩行者が小走りする様子から急な横断を予測し、速度を低下させた人はほとんど存在しなかったと考えられる。制限速度よりも若干速度が低かった理由は、バスの後方からの歩行者横断に備える等、別の理由であった可能性が考えられる。

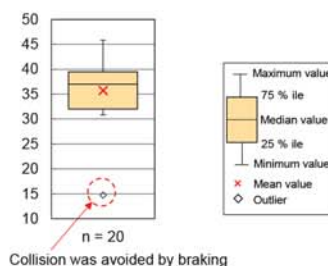


Fig.8 Ego vehicle speed of time the pedestrian began to cross the road (Scene 1)

3. 2. 場面 2

図9は場面2において、実験参加者の回避行動の割合を示したものである。凡例中の括弧内に回避行動別に衝突回避または衝突した件数を示している。本場面では全ての実験参加者がブレーキ操作による回避を試み、そのうちの45%(9例)は右方向への操舵も行った(9例とも衝突)。また、ブレーキ操作のみによる回避を試みた11例のうち、7例(全体の35%)は衝突を回避した。本場面では全体の65%が衝突した。

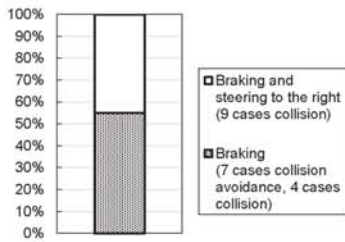


Fig.9 Rate of driving behavior for avoiding a collision (Scene 2)

図 10 は自転車の前輪が視認可能となった時点からブレーキ反応時間の分布を、衝突した 13 名と衝突を回避した 7 名に分けて箱ひげ図で表したものである。有意水準 5% のクラスカル=ウォリスのノンパラメトリック検定で有意な差が見られた。衝突した 13 名の多くは自転車の前輪が視認可能となってからブレーキ操作を開始したのに対し、衝突を回避した人の多くは自転車の前輪が視認可能となる前にブレーキ操作を開始していることから、生垣の上から見えていた自転車乗員の頭部が移動する様子を視認し、横断を予測して早めにブレーキ操作を行ったものと考えられる。

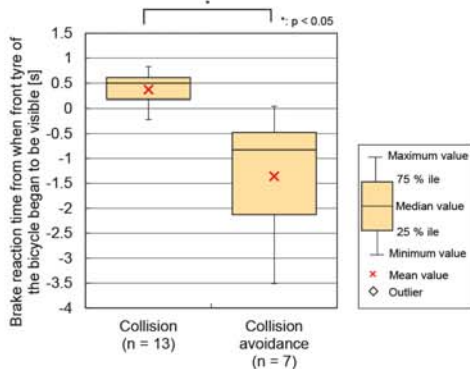


Fig.10 Distribution of brake reaction time (Scene 2)

図 11 は自転車が発進した時点の自車の速度を、衝突した 13 名と衝突を回避した 7 名に分けて箱ひげ図で表したものである。有意水準 5% のクラスカル=ウォリスのノンパラメトリック検定で有意な差は見られ

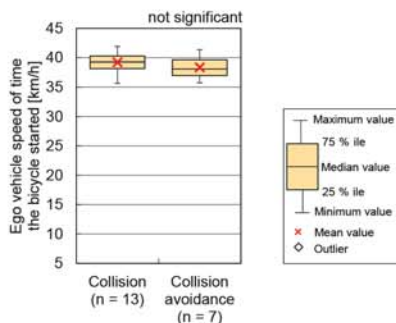


Fig.11 Distribution of Ego-vehicle speed (Scene 2)

なかった。自転車が発進した時点の自車の速度は、衝突した 13 名及び衝突を回避した 7 名ともに、37km/h ~ 40km/h に多くのデータが分布していることから、いずれも交差点の手前で速度を大きく低下させることは行っていない。この理由は自車が優先道路を走行していたためであると考えられる。

3. 3. 場面 3

図 12 は場面 3 において、実験参加者の回避行動の割合を示したものである。凡例中の括弧内に回避行動別に衝突回避または衝突した件数を示している。本場面で最も多かったのは、自転車が駐車車両を避けるために対向車線に向かって横移動を開始した直後にブレーキ操作を行うケース (11 例、全体の 55%) で、次に多かったのは、あらかじめ自車の速度を低下させて自転車の後方を追従するケース (3 例、全体の 15%) であった。その他、右方向への操舵 (2 例)、右方向へ操舵しながら加速 (1 例)、速度超過して自転車が横移動を開始する前に自転車を追越す (1 例)、回避行動なし (2 例) であった。

本場面では、前方の自転車を視認可能で、自転車が駐車車両を避けるために横移動することをある程度予測しやすかったことから、回避行動にさまざまなバリエーションが表れたものと考えられる。また、衝突した事例は 3 例 (全体の 15%) であり、3 つの場面で最も少なかった。3 例はいずれも自車の左側面への衝突であり、自車の前面に衝突した例はなかった。

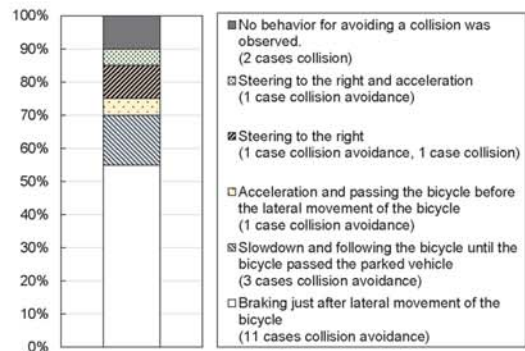


Fig.12 Rate of driving behavior for avoiding a collision (Scene 3)

図 13 は自転車が横移動を開始した時点における自車の速度を全実験参加者 (図中(a)) とブレーキ操作によって回避した 11 名 (図中(b)) に分け、箱ひげ図で表したものである。図中(a)より、あらかじめ速度を落として自転車の後方を追従した 3 名については、自転車の速度と同程度以下であった。また、加速して自転

車が横移動を開始する前に自転車を追い越した 1 名については約 61km/h であり、自転車の横移動を予測して意図的に速度を上昇させた結果であると考えられる。残りの 16 名については、約 29km/h (25%ile 値) ~ 約 38km/h (75%ile 値) であり、やや広範囲に分布している。一方、図中(b)より、ブレーキ操作によって回避した 11 名については、約 30km/h (25%ile 値) ~ 約 32km/h (75%ile 値) であり、より狭い範囲に分布していることから、ブレーキ操作で回避した実験参加者についても、多くの人は自転車の横移動を予測し、やや速度を低下させたものと考えられる。

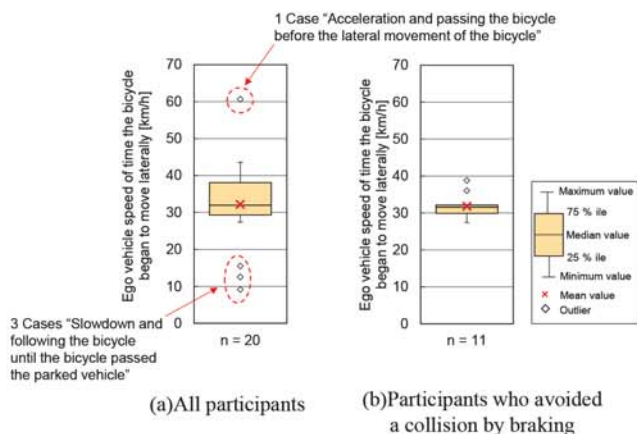


Fig.13 Ego vehicle speed of time the bicycle began to move laterally (Scene 3)

4. まとめ

本研究では、2025~2030年に実用化が予想される自動運転車を想定し、自動運転車が事故を回避することが困難であると考えられる場面のうち、3つの場面を選定し、ドライバの回避行動を分析するためのDS実験を実施した。

自車の前方の歩道上を、自車と同方向に歩行する歩行者が対向車線に停車したバスに乗車するため、小走りしながら急に横断する場面(場面1)では、90%の実験参加者が衝突した。多くのドライバにとって、歩道上の歩行者が通常の歩行から小走りに変化する様子から、急に横断することを予測することは困難であることが分かった。但し、横断前の歩行者の挙動に後方を振り返る等の動作が含まれていた場合には、横断を予見し速度を低下させるドライバが存在した可能性も考えられる。

自車が優先道路を走行中に、見通しの悪い交差点で左から自転車が横断する場面(場面2)では、35%の実験参加者がブレーキ操作によって衝突を回避した。

回避した人のブレーキ操作開始タイミングの結果から、生垣の上から自転車乗員の頭部が移動する様子を捉え、対象物の全体像が現れる前に回避行動を行ったものと考えられる。危険予知能力が優れたドライバは、危険対象物のごく一部しか視認できない状況であっても、対象物の接近を見逃さずに回避行動を行うことが確認された。

自車の前方を走行する自転車が駐車車両を避けるために横移動する場面(場面3)では、85%の実験参加者が衝突を回避した。対象物を連続して視認可能かつ対象物の行動をある程度予測しやすい場面では、さまざまな回避行動が見られ、衝突を回避する確率がより高くなることが分かった。

本研究の実験結果をもとに、自動運転車が実験場面と同様の危険場面に遭遇した際に、衝突を回避可能であることが「自動運転車が備えるべき安全の範囲と水準」の範囲内であるとして自動運転車に求めた場合、現在の技術では、場所を選ばず、危険事象の発生に備え、一律に走行速度を低下させることも選択肢の一つになると考えられる。この場合、円滑な交通への影響が懸念される。このため、実験結果の活用方法(取扱い)については慎重な議論が必要である。

また、場面1と場面2については、相手(歩行者または自転車)側が道路交通法を守らなかったことが危険事象発生の原因である。本研究では検討対象としていないが、相手側の法令違反に対し、自動運転車としてどこまで対応する必要があるのかという点について、過失責任等の法的な観点からも今後検討することが必要である。

WGでは、自動運転車の社会実装等について議論を行っている他の会議体との情報共有も行いながら、引き続き検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 高橋奈々ほか: 自動運転の高度化に向けたASV (advanced safety vehicles)の更なる推進、自動車技術会学術講演会予稿集(春)(2022)、20225191
- 2) 自動運転の公道実証実験に係る道路使用許可基準、別添、警察庁(2023)