

自動運転車導入による生活道路交差点部周辺の出合い頭事故削減可能性の評価 The Impact of the Introduction of Autonomous Vehicles on Crossing Accidents Around Non-Signalized Intersections on Residential Roads

長谷川 裕修¹, 新屋 敷学², 葛西 誠³, 田村 亨⁴

Hironobu HASEGAWA¹, Manabu SHINYASHIKI², Makoto KASAI³, Tohru TAMURA⁴

地方部における公共交通の代替・補完手段としての自動運転車への期待は大きい。本研究は生活道路に自動運転車が導入された場合に地域の安全性にどのような影響を与えるかを検討することを目的とする。見通しが悪く車両側に一時停止規制がない交差点における歩行者・自転車利用者と車両との接触可能性をモデル化し、このモデルを用いて秋田県秋田市飯島長野中町において自動運転車が導入された場合の地域の交差点部周辺での安全性を評価した。自動運転車と従来車両（通常反応）の比較により、歩行者事故は98.5%の減少、自転車事故は25.7%の減少、歩行者事故において衝突回避可能な低速域がないケースは93.3%の減少、同じく自転車事故においては66.7%の減少となり、自動運転車導入による地域の安全性向上が期待できることが明らかとなった。

There are high expectations for autonomous vehicles as an alternative and complementary means of public transportation in rural areas. The purpose of this study is to investigate the impact of the introduction of autonomous vehicles on regional traffic safety. The possibility of collision between pedestrians or bicyclists and vehicles at an intersection with poor visibility and no stop restrictions on the vehicle side was modeled, and this model was applied to evaluate the safety of the area around the non-signalized intersections in Iijima-Naganonaka-Cho, Akita City, Akita Prefecture. The results showed that compared to conventional vehicles (normal response), automated vehicles had 98.5% fewer pedestrian crashes, 25.7% fewer bicycle crashes, 93.3% fewer pedestrian crashes without a low speed range for crash avoidance, and 66.7% fewer bicycle crashes without a low speed range for crash avoidance. It was found that the introduction of autonomous vehicles is expected to improve safety in the region.

Keywords: 交通安全, 生活道路, 自動運転車

Traffic Safety, Residential Roads, Autonomous Vehicles

1. はじめに

過疎と高齢化が進む地方部においては公共交通網の維持が困難な地域も出始めており、移動の足を持たない子どもや高齢者などには公共交通と自宅を結ぶラストワンマイルの移動も問題となる。このような問題に対して、近年盛んに技術開発や制度設計が進められている自動運転車に対する期待は大きい。自宅へのアクセスに用い

られる生活道路を運転自動化レベル5の車両が走行可能となる見通しは立っていない。

運転自動化レベル5は場所を限定せずにシステムが全てを操作する。システムにとって最も過酷な環境の1つは、幅員が狭く、視距も十分でない上に多様な交通主体が整序されずに混在する生活道路であろう。生活道路で自動運転車を走行させる場合、その場での判断に対する

1 正会員, 博士 (工学), 秋田工業高等専門学校

Member, Dr. Eng., National Institute of Technology, Akita College

〒011-8511 秋田県秋田市飯島文京町1-1 e-mail: hasegawa@akita-nct.ac.jp Phone: 018-847-6067

2 正会員, 学士 (工学), 株式会社構造計画研究所

Member, B. Eng., Kozo Keikaku Engineering Inc.

3 正会員, 博士 (工学), 秋田工業高等専門学校

Member, Dr. Eng., National Institute of Technology, Akita College

4 正会員, 工学博士, 北海商科大学

Member, Dr. Eng., Hokkai School of Commerce

制約条件として交通規制が適用され、システムはそれを遵守することが想定される。現時点では技術的にも制度的にも生活道路での完全自動運転は不可能であり、現在を起点として将来を考えるフォーキャスト思考では実現の道筋を見いだすことは難しい。したがって、将来のあるべき姿を「生活道路での完全自動運転が可能な社会」と設定し、その実現のために今何をすべきかを考えるバックキャスト思考が必要となる。筆者らは自動運転車が生活道路を走行可能となったと仮定し、その場合に地域の交通安全にどのような影響があるのかを明らかにすることで、将来のあるべき姿に向けた課題整理の一助となるべく本研究を実施した。

自動運転車や先進安全車両導入による生活道路での安全性向上について検討した研究として、高橋^{1,2)}によるものや謝ら³⁾によるものがある。高橋は交通事故例調査(マイクロデータ)を用いて、四輪車同士の交差点での出会い頭事故¹⁾や四輪車と自転車との出会い頭事故²⁾について、緊急自動ブレーキシステムによる衝突回避の可能性を検討している。茨城県つくば地区周辺で発生した四輪車同士の出会い頭事故200件のマイクロ事故データを用いて車両側余裕距離に基づく分析を行った結果、緊急自動ブレーキシステムが相手車両を検知すると同時に制動を開始したと仮定した場合、衝突回避可能性が1当の場合86%、2当の場合81%であったと報告している¹⁾。同様に、自転車と四輪車の出会い頭事故200件のマイクロ事故データを用いた分析の結果、緊急自動ブレーキシステムが自転車を検知すると同時に制動を開始したと仮定した場合、衝突回避可能性が8割強であったと報告している²⁾。また、謝ら³⁾は生活道路において発生した出会い頭事故1件をモデルケースとして、先進安全車両導入による事故防止・軽減効果を高橋^{1,2)}と同様のモデルを構築して検討した。その結果、先進安全車両の導入によって歩行者事故は削減可能であるが、走行速度の速い自転車との事故を防ぐのは難しく、必要に応じて車両が10km/h程度で走行する必要があることを指摘している。

以上の既往研究は個別の事故に対して自動運転導入が与える影響を検討したものである。しかし、地域の交通安全を考えた場合、自動運転導入が地域に与える影響を面的に評価することが重要である。筆者らは過去に秋田県秋田市飯島長野中町内の交差点のうち、見通しを阻害する遮蔽物があり、かつ、車両側に一時停止規制がない交差点63箇所を対象として、歩行者の通行位置と車両との接触危険性との関係をモデル化し、歩行者通行位置の定量的な安全性評価を試みている⁴⁾。この結果、秋田市飯島長野中町の交差点部周辺においては左側歩行の方が安全であることを報告している。

本研究はこの既報論文⁴⁾の枠組みを拡張し、自動運転車およびその前段階としての先進安全自動車が生活道路を

走行した場合の地域の安全性を定量的に評価することを目的とする。具体的には、見通しを阻害する遮蔽物があり、かつ、車両側に一時停止規制がない交差点における歩行者および自転車利用者と車両との接触危険性をモデル化し、このモデルを用いて秋田県秋田市飯島長野中町において自動運転車・先進安全自動車が導入された場合の地域の交差点部周辺での安全性を評価した。

2. 研究方法

2.1 自転車事故の定式化

本節では、筆者らの過去の研究⁴⁾と同様に、高橋の方法論^{1,2)}を援用して自転車と自動車の事故を定式化する。

図1および図2に無信号かつ車両側に一時停止規制がなく、見通しが悪い生活道路の交差点周辺において、道路右側を通行する自転車(逆走)と右から左に向かう車両(車左)が衝突する事故の模式図を示す。図1と図2の違いは隅切の有無であり、全ての交差点は直交すると仮定する。なお、車両が左から右に向かう場合(車右)も同様の定式化が可能である。

定式化に際していくつかの仮定を置く。三谷ら⁵⁾の細街路同士の交差点におけるビデオ調査の結果に基づいた報告によると、

- 非優先側の自転車が交差点に進入する場合、6割が減速すらず、3割程度が減速ししない傾向
- 見通しのきかない細街路小交差点においては徐行義務があるにも関わらず、一時停止遵守率は徐行を含めても1割から2割程度

である。よって、本研究では交差点への進入時に減速しない自転車を仮定することとする。また、車両は自転車を認知可能な地点Aに走行速度 V_A (km/h)で到達したのち、一定の反応時間を経てブレーキをかけるものとし、ハンドル操作は行わないと仮定する*1なお、車両・自転車ともに大きさや形状は考慮せず、点とみなす。図1に示したように、Aと自転車の認知可能地点Bおよび遮蔽物Oの端点 O_0 が一直線上にあるときに車両運転手が最も早く自転車を認知可能となる。このとき、 O_0 とAとの鉛直距離を w_A (m)、 O_0 とBとの水平距離を w_B (m)、時刻 0 (s)とする。また、自転車が V_B 、車両が V_A でそのまま進んだ場合に経過時間 t_C (s)において衝突する衝突予定地点Cとし、CとAとの距離を車両側認知可能距離 D_{recog} (m)とすると、 D_{recog} は次のように求められる。

$$\frac{w_A}{D_{\text{recog}} - w_B} = \frac{V_B t_C}{V_A t_C}$$
$$D_{\text{recog}} = w_B + \frac{V_A}{V_B} w_A \quad (1)$$

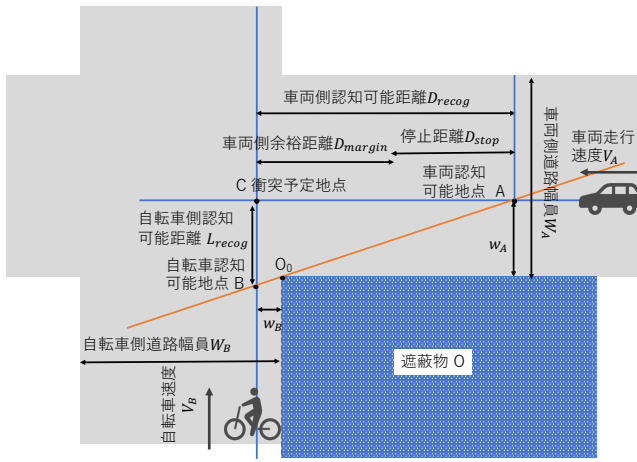


図1 自転車事故模式図（逆走・車左・隅切なし）

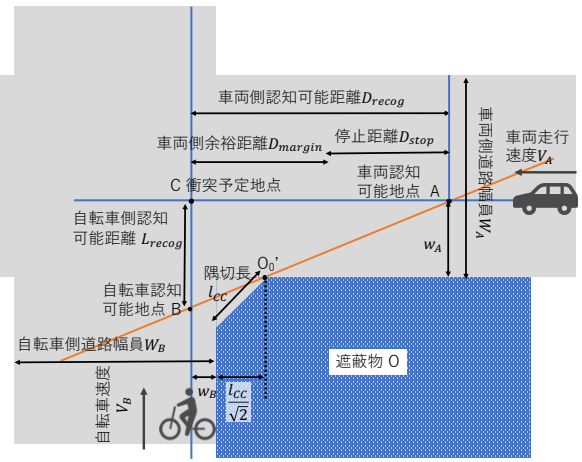


図2 自転車事故模式図（逆走・車左・隅切あり）

続けて隅切のある場合の車両側認知可能距離の定式化を行う。図2に図1の遮蔽物Oの角に隅切があることを想定した場合の模式図を示す。隅切りの形状は通常、二等辺三角形である。本研究では交差点が直交すると仮定することから、隅切の形状は自転車側・車両側いずれからも等しく見通しを改善する直角二等辺三角形（底角45°）とする。隅切長を l_{cc} (m) とすると、Oの端点は元の位置から右に $\frac{l_{cc}}{\sqrt{2}}$ 移動する。移動後の点を O'_0 とすれば、 O'_0 とBとの水平距離は $w_B + \frac{l_{cc}}{\sqrt{2}}$ (m) となる。これを (1) 式の w_B に代入すれば、(2) 式を得る。

$$D_{recog} = w_B + \frac{V_A}{V_B} w_A + \frac{l_{cc}}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

一方、車両が自転車を認識してから停止するまでに移動する停止距離 D_{stop} (m) は、反応時間 t_r (s)、重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 、縦すべり摩擦係数 f として、道路構造令における制動停止視距⁶⁾を援用し、(3) 式で求める。

$$D_{stop} = \frac{V_A t_r}{3.6} + \frac{V_A^2}{2gf \cdot 3.6^2} \quad (3)$$

なお、(3) 式中の右辺第1項はブレーキが効き始めるまでの空走距離を、第2項は制動距離をそれぞれ表しており、隅切の有無は停止距離に影響を与えない。また、制動距離は物理法則に従うため、自動運転車や先進安全自動車であっても手動運転との違いは無いと考えられる。従って、(3) 式において自動運転車や先進安全自動車と手動運転との違いは空走距離のみとなる。

車両が自転車を認識してから停止するまでに進む距離を車両側余裕距離 D_{margin} (m) とすると、図1および図2より $D_{margin} = D_{recog} - D_{stop}$ であるから、(4) 式を得る。

$$D_{margin} = w_B + \frac{V_A}{V_B} w_A + \frac{l_{cc}}{\sqrt{2}} - \frac{V_A t_r}{3.6} - \frac{V_A^2}{2gf \cdot 3.6^2} \quad (4)$$

ここで、

$$l_{cc} = \begin{cases} l_{cc} & \text{隅切あり} \\ 0 & \text{隅切なし} \end{cases} \quad (5)$$

$D_{margin} > 0 \text{ m}$ であれば、自転車がCに到達したとき、車両はCより手前で停止可能であり、衝突を回避できる。この場合、絶対値が大きいほど安全である。また、 $D_{margin} = 0 \text{ m}$ であれば、自転車がCに到達したときにちょうど車両もCに到達して衝突する。 $D_{margin} < 0 \text{ m}$ であれば、自転車がCに到達したときには車両は通り過ぎている。この場合も、絶対値が大きいほど衝突の可能性は低い。

既報論文⁴⁾では、道路運送車両法で定められる小型乗用車を基準として、その車長 4.7 m の範囲内で衝突の可能性が生じると考え、Cを原点として $-2.35 \text{ m} \leq D_{margin} \leq 2.35 \text{ m}$ を危険、それ以外を安全という単純な二値分類で危険性を判断していた。しかし、

- $|D_{margin}|$ の値が 0 m に近いほど危険性が高い
- D_{margin} の値が正の場合と負の場合では、衝突または回避する状況が大きく異なる。

ことを考慮した方がより適切な評価が可能となる。以上を踏まえて本研究では $-2.35 \text{ m} \leq D_{margin} \leq 2.35 \text{ m}$ の範囲において、より詳細な検討を行う。

2.2 歩行者事故の定式化

歩行者は交通安全行動に未習熟な幼児・児童を想定して、常に一定の歩行速度 V_B (km/h) で図の鉛直方向を上へに直進すると仮定する。従って、前節の内容を以下のように

- 自転車を歩行者に、
- 逆走を右側歩行に、
- 順走を左側歩行に、
- 自転車を表す記号Bを歩行者を表す記号Pに、
- 自転車速度を歩行速度に、

それぞれ読み替えば、歩行者事故も同様の定式化が可能である。詳細は既報論文⁴⁾を参照されたい。

表1 計算条件の分類 (単位: 通り)

隅切				
	1. 両方	2. 右のみ	3. 左のみ	4. なし
遮蔽物				
1. 両方	64	64	64	64
2. 右のみ	32	32	32	32
3. 左のみ	32	32	32	32

表2 対象交差点63箇所の分類 (単位: 箇所)

隅切				
	1. 両方	2. 右のみ	3. 左のみ	4. なし
遮蔽物				
1. 両方	34	4	4	7
2. 右のみ	3	3	1	1
3. 左のみ	2	1	3	0

2.3 ケーススタディ

秋田工業高等専門学校に隣接する住宅地であり、同校生による通学路利用が多い秋田県秋田市飯島長野中町内の交差点のうち、見通しを阻害する遮蔽物があり、かつ、車両側に一時停止規制がない交差点63箇所を現地踏査により抽出し、ケーススタディの対象とした。なお、遮蔽物には建築物およびブロック塀の他、生け垣も含まれるが、踏査実施時点において、遮蔽物の隙間から見通しが可能となるような状態はなかった。

本研究では、事故類型を歩行者通行位置 (右歩・左歩) および自転車通行位置 (順走・逆走) 別の4種類と考える。歩行者は歩道 (等) のない道路では原則として右側端を通行しなければならない。また、軽車両である自転車は左側通行が順走であり、右側通行が逆走である。

計算条件は交差点ごとに最大64通り (車両進行方向・路面状態各2水準, 事故類型・反応時間各4水準) である。表1に隅切と遮蔽物の条件別に分類した計算条件を、表2に対象交差点の分類を示す。

表1および表2の隅切条件を $i = 1, 2, 3, 4$ で、遮蔽物条件を $j = 1, 2, 3$ で表し、表1の各要素を a_{ij} 、表2の各要素を b_{ij} とすると、計算パターン総数は $\sum a_{ij}b_{ij}$ で表され、3584通りとなる。

2.4 車両側余裕距離の計算条件

図3に車両進行方向が左の場合の自転車通行位置 w_B の模式図を示す。自転車の通行位置は、道路構造令に定められた自転車道の設計に用いる占有幅⁶⁾を基準とし、道路端から0.5mとする^{*2}。三谷・山中⁵⁾は幅員が4mから6m程度の細街路同士の交差点を対象としたビデオ調査を行い、非優先道路側を走行する自転車の交差点

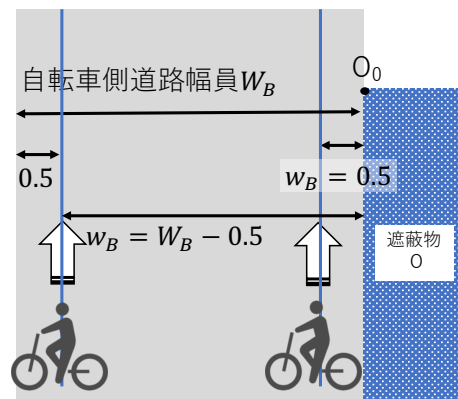


図3 自転車通行位置模式図 (車両進行方向左)

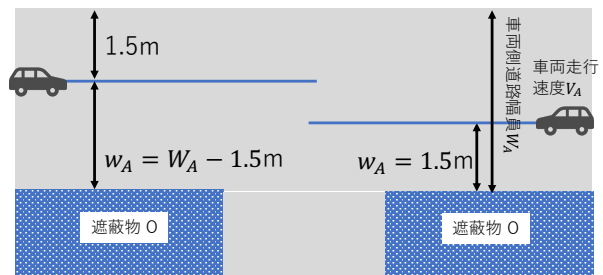


図4 車両位置模式図

への進入速度が順走の場合 10 km/h、逆走の場合 6 km/hであることを報告している。本研究ではこの報告に基づき、自転車速度 V_B を、順走の場合 $V_B = 10 \text{ km/h}$ 、逆走の場合 $V_B = 6 \text{ km/h}$ とする。

通行位置は遮蔽物と自転車との距離であるから、自転車逆走・車両進行方向左と自転車順走・車両進行方向右の場合は $w_B = 0.5 \text{ m}$ となり、自転車順走・車両進行方向左と自転車逆走・車両進行方向右の場合は $w_B = W_B - 0.5 \text{ m}$ となる。ここで、 $W_B \text{ (m)}$ は自転車側道路の道路幅員である。

歩行者は道路端から 0.375 m の位置を歩行速度 $V_p = 4.36 \text{ km/h}$ ⁷⁾で歩行すると仮定する。歩行者の通行位置は、既報論文⁴⁾では道路端から 0.5 m としていたが、本研究では先述した自転車通行位置と同様に道路構造令に定められた歩行者の占有幅⁶⁾を基準とし、0.375 mとする^{*3}。なお、この変更を既報論文⁴⁾の計算条件に適用した場合、個別の危険・安全の分類結果には一部影響があるが、集計結果への影響はほぼないことを確認済みである。

図4に車両位置 w_A の模式図を示す。車両は運転手座席位置が道路端から 1.5 m の位置を法定速度 $V_A = 30 \text{ km/h}$ で走行すると仮定する。よって、車両進行方向が左の場合 $w_A = 1.5 \text{ m}$ 、車両進行方向が右の場合は $w_A = W_A - 1.5 \text{ m}$ となる。ここで、 $W_A \text{ (m)}$ は車両側道路の道路幅員である。

反応時間 t_r は従来車両については既報論文⁴⁾と同様に通常反応の場合 (「通常」) $t_r = 0.75 \text{ s}$ ⁸⁾、反応が遅れ

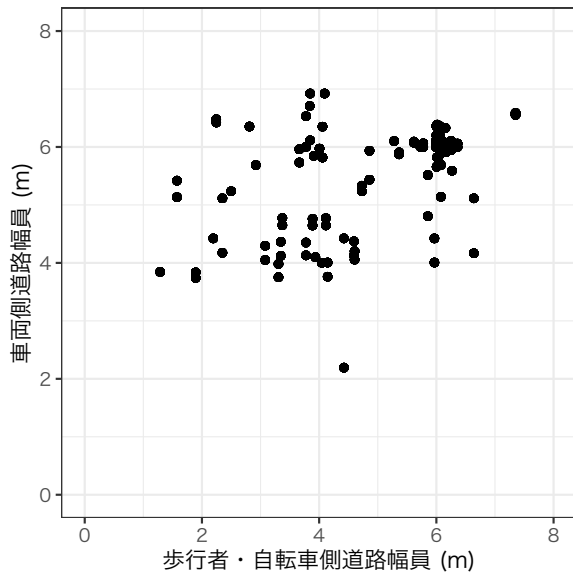


図5 計算パターン別道路幅員の分布

た場合（「遅れ」）として $t_r = 2.50\text{ s}$ ⁸⁾を用いる。先進安全自動車（advanced safety vehicle）の場合（「ASV」）は謝ら³⁾を参考に $t_r = 0.50\text{ s}$ を、自動運転車（autonomous vehicle）の場合（「AV」）は高橋²⁾を参考に $t_r = 0\text{ s}$ をそれぞれ用いる。本研究では現実的で最適な反応時間を求めることまでは目的とせず、生活道路において自動運転を行う際に必要となる反応時間がどの程度となるかを把握することを目的とする。従って、原理的に不可能^{*4)}ではある $t_r = 0\text{ s}$ を含め、2.5 sまでの4水準を設定している。ただし、今後の技術開発・研究展開の動向に応じてAVとASVの反応時間の見直しが必要である。

縦すべり摩擦係数 f は江守⁹⁾を参考に、アスファルトの乾燥路面の場合（乾燥） $f = 0.70$ 、湿潤路面の場合（湿潤） $f = 0.45$ を用いる。

隅切長 l_{cc} は一律に $l_{cc} = 2\text{ m}$ と仮定する。また、交差点は全て直交し、隅切が無い場合の遮蔽物Oの内角は 90° であると仮定する。

それぞれの交差点における自転車・歩行者側および車両側道路幅員は、GIS上で数値地図（国土基本情報）の道路中心線（道路中心線データ）が交差する箇所から半径 10 m の位置における幅員（道路構成線データ）を用いて計測した。計測方法の詳細は既報論文⁴⁾を参照されたい。図5に計算パターン別の道路幅員の分布を示す。図の横軸は歩行者側および自転車側道路幅員、縦軸は車両側道路幅員である。車両側道路幅員は 4 m から 7 m に集中しているのに比べて、歩行者側および自転車側道路幅員はバラツキが大きいことが分かる。なお、道路幅員が 5.5 m を超える道路を含めて、全ての道路に中央線はなく、道路の利用状況に差異はないため2.1節および2.2節に示したモデルが適用可能である。

2.5 衝突回避可能速度の算出

車両が法定速度 $V_A = 30\text{ km/h}$ で走った場合に危険と判定された計算条件について、車両走行速度を変化させることで安全に停止可能となるかを検討する。

$D_{\text{margin}} > 2.35\text{ m}$ を満たす衝突回避可能速度 V_A^+ は(4)式より(6)式に示す二次不等式の解として求められる。同様に、 $D_{\text{margin}} < -2.35\text{ m}$ を満たす衝突回避可能速度 V_A^- は(7)式に示す二次不等式の解として求められる。

$$aV_A^{+2} + bV_A^+ + c^+ < 0 \quad (6)$$

$$aV_A^{-2} + bV_A^- + c^- > 0 \quad (7)$$

よって、

$$\frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac^+}}{2a} < V_A^+ < \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac^+}}{2a} \quad (8)$$

$$V_A^- < \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac^-}}{2a}, V_A^- > \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac^-}}{2a} \quad (9)$$

ただし、 $V_A^+, V_A^- \geq 0$

ここで、

$$a = 1$$

$$b = \frac{3.6w_A - V_B t_r}{V_B} (-2gf \cdot 3.6)$$

$$c^+ = \left(w_B + \frac{l_{CC}}{\sqrt{2}} - 2.35 \right) (-2gf \cdot 3.6^2)$$

$$c^- = \left(w_B + \frac{l_{CC}}{\sqrt{2}} + 2.35 \right) (-2gf \cdot 3.6^2)$$

3. 結果

3.1 車両側余裕距離の算出結果

図6に車両側余裕距離の算出結果を示す。図の横軸は車両側余裕距離であり、横棒は反応時間別に色を塗り分けている。縦軸は車両側余裕距離の絶対値を昇順に並べ替えた時の順位を表しており、順位が小さいほど危険性が高い。車両側余裕距離が -2.35 m および 2.35 m の位置に描かれた2本の縦破線の間には横棒が収まっているものが危険、収まっていないものが安全と判定される。また、縦軸の順位が708位の位置に描かれた横破線を境に上側が安全と判定されたものであり、下側が危険と判定されたものである。図6より、それぞれの反応時間ごとに以下の傾向が読み取れる。

- 「AV」（ $t_r = 0\text{ s}$ ）：危険と判定されるものは450位から500位近くに集中し、正の値が多い。安全と判定されるものも正の値を持つものが多い
 - 「通常」（ $t_r = 0.75\text{ s}$ ）および「ASV」（ $t_r = 0.50\text{ s}$ ）：危険と判定されるものは $-2.35\text{ m} \leq D_{\text{margin}} \leq 2.35\text{ m}$ の間に広く分布する。安全と判定されるものも正負どちらにも広く分布する
 - 「遅れ」（ $t_r = 2.50\text{ s}$ ）：危険と判定されるものはほとんどなく、安全と判定されるものは負の値を持つ
- 表3に反応時間と危険・安全判定のクロス集計結果を

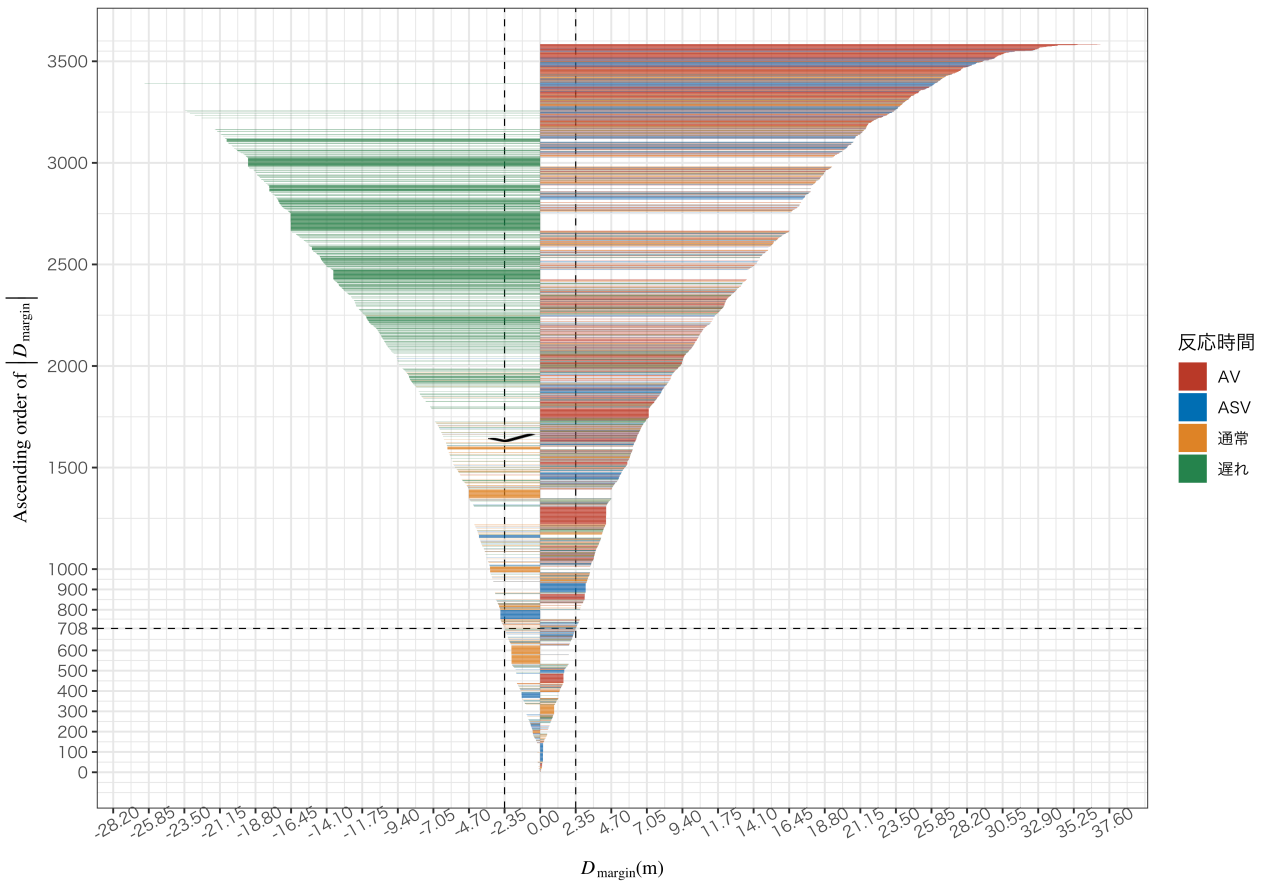


図6 反応時間別の車両側余裕距離

示す。「AV」の危険率 11.8% および「遅れ」の危険率

表3 反応時間別の危険性判定

反応時間	危険 (%)	安全 (%)
AV	106 (11.8%)	790 (88.2%)
ASV	258 (28.8%)	638 (71.2%)
通常	277 (30.9%)	619 (69.1%)
遅れ	67 (7.5%)	829 (92.5%)

χ^2 statics = 237.28

P-value = 0

7.5%に比べて、「ASV」の危険率 28.8% および「通常」の危険率 30.9% と高い。また、クロス集計結果に対するピアソンの χ^2 検定の結果、 χ^2 値 = 237.28, P値 = 0 と反応時間ごとの危険性に有意な差があることが明らかとなった。

表4に反応時間と事故類型別の危険性判定結果を示す。表中の危険+は $0\text{m} \leq D_{\text{margin}} \leq 2.35\text{m}$, 危険-は $-2.35\text{m} \leq D_{\text{margin}} \leq 0\text{m}$, 安全+は $D_{\text{margin}} > 2.35\text{m}$, 安全-は $-2.35\text{m} > D_{\text{margin}}$ にそれぞれ対応する。表4より以下のことがわかる。

- 反応時間ごとの危険判定数は「遅れ」の67件が最も

表4 反応時間と事故類型別の危険性判定

反応時間	事故類型	危険+	危険-	安全+	安全-
AV	右歩	1	0	223	0
	左歩	1	0	222	1
	逆走	58	1	165	0
ASV	順走	36	9	177	2
	右歩	57	14	152	1
	左歩	12	2	208	2
通常	逆走	46	14	106	58
	順走	50	63	75	36
	右歩	44	57	108	15
遅れ	左歩	27	9	184	4
	逆走	4	46	102	72
	順走	58	32	39	95
遅れ	右歩	6	8	74	136
	左歩	7	4	66	147
	逆走	29	13	28	154
遅れ	順走	0	0	0	224

少なく、「AV」106件、「ASV」258件、「通常」277件と続く

- 危険と判定されたケースについて、ASV-順走, 通

常-右歩, 通常-逆走, 遅れ-右歩の4パターンのみが衝突予定地点を超過してから衝突し, それ以外の反応時間と事故タイプの組み合わせでは衝突予定地点の手前で衝突する

- 安全判定されたケースについて, 「AV」と「ASV」は全ての事故タイプで安全+が多く, 「通常」は順走のみ安全-が多く他は安全+が多い, 「遅れ」は全ての事故タイプで安全-が多い
- 歩行者(右歩事故と左歩事故の合計)に対する安全性は「AV」が最も高く, 「遅れ」, 「ASV」, 「通常」が続く
- 歩行者に対する反応時間ごとの危険判定数は右歩・左歩ともに「AV」が最も少なく, 「遅れ」, 「ASV」, 「通常」と続く
- 右歩事故は「AV」と「ASV」では危険+の方が危険-よりも多く, 「通常」と「遅れ」では危険-の方が多い
- 左歩事故は全ての反応時間で危険+の方が危険-よりも多い
- 自転車(順走事故と逆走事故の合計)に対する安全性は「遅れ」が最も高く, 「AV」, 「通常」, 「ASV」が続く
- 自転車に対する反応時間ごとの危険判定数は逆走・順走ともに「遅れ」が最も少ない. 逆走はこれに「通常」, 「AV」, 「ASV」が続く. 順走はこれに「AV」, 「通常」, 「ASV」が続く
- 「AV」と「遅れ」は順走事故以外の事故タイプでは危険判定されたものの傾向が類似しており, 歩行者事故に対しての安全性が高く, 逆走事故に対する危険性が高い
- 「ASV」と「通常」は危険判定されたものの傾向が類似しており, 右歩事故と順走事故の危険性が特に高く, 次に逆走事故, 左歩事故と続く
- 逆走事故の危険性はどの反応時間でも高く, 「通常」以外は危険-より危険+の方が多い
- 順走事故の危険性は「AV」・「ASV」・「通常」で高いが, 「遅れ」では低い
- 右歩事故と左歩事故を比較すると, どの反応時間でも左側歩行者の方が危険性が低いか等しい

図7に反応時間と事故タイプ別の車両側余裕距離を階級幅0.235で危険と判定される $-2.35 \leq D_{\text{margin}} \leq 2.35$ の範囲を集計した頻度分布を示す. 各ヒストグラムの中央部 ($D_{\text{margin}} = 0$) は相対的に危険度が高く回避が困難であり, 両端部 ($D_{\text{margin}} = -2.35, 2.35$) に近づくにつれて相対的に危険度が低くなる. また, 中央部から左側は歩行者または自転車が衝突予定地点Cに到達時に車両はCを通り過ぎている場合を表し, 中央部から右側は歩行者または自転車が衝突予定地点Cに到達時に車両はCより

手前で停止している場合を表す. 図7から以下のことがわかる.

- 「AV」: 逆走事故の場合に危険度の高い事故が発生する傾向がある
- 「ASV」: 右歩きと逆走の場合に危険度の高い事故が発生する傾向がある
- 「通常」: 順走の場合に危険度の高い事故が発生し, 右歩きの場合にやや危険度の高い事故が発生する傾向がある
- 「遅れ」: 事故タイプごとに危険度の高い事故が起きやすい特定のパターンはない

3.2 衝突回避可能速度の算出結果

図8に算出した反応時間別の衝突回避可能速度域として図化したものを示す. 図の縦軸は図6と同様に車両側余裕距離の絶対値を昇順に並べ替えた時の順位(危険と判定された708位まで)を表しており, 順位が小さいほど危険性が高い. 図の横軸は衝突回避が可能となる車両走行速度の範囲を示しており, 横棒の範囲内の速度で衝突が回避可能であることを表している. ただし, 衝突回避可能速度の上限値は解析的には無限大となるが, 図中では55 km/h弱までを描画している. なお, 以降の議論において, 衝突回避可能速度が30 km/h未満を低速域, 30 km/hより大きいものを高速域と定義する. 図8のAV-左歩のように低速域に衝突回避可能速度がないケースがある. これらのケースの反応時間と事故タイプ別の集計結果を表5に示す. 反応時間別に多い順に並べると「通常」72件 > 「ASV」38件 > 「AV」20件 > 「遅れ」4件の順に, 事故タイプ別に多い順に並べると「逆走72件 > 順走29件 > 右歩26件 > 左歩7件」の順になる. これらのケースにおいても論理的には高速域での走行によって事故を回避することが可能である.

一方で, 図8において, 低速域の回避可能速度が存在するケースでは速度制限によって事故を回避可能であり, これは必ずしも縦軸の順位が小さい(=30 km/hでの回避が難しい)ものに限定されない. ただし, 以下のように低速域が存在したとしても範囲が狭かったり極端な低速である場合もあるが, 「AV」であればシステムがこの速度を遵守可能である.

- 低速域が10 km/h前後の狭い範囲にのみ分布(ASV-逆走の50から100位付近, 通常-右歩の550位前後など)
- 低速域が10 km/h弱の狭い範囲にのみ分布(遅れ-右歩の640位付近など)
- 低速域が20 km/h弱の狭い範囲にのみ分布(ASV-右歩の500位付近など)

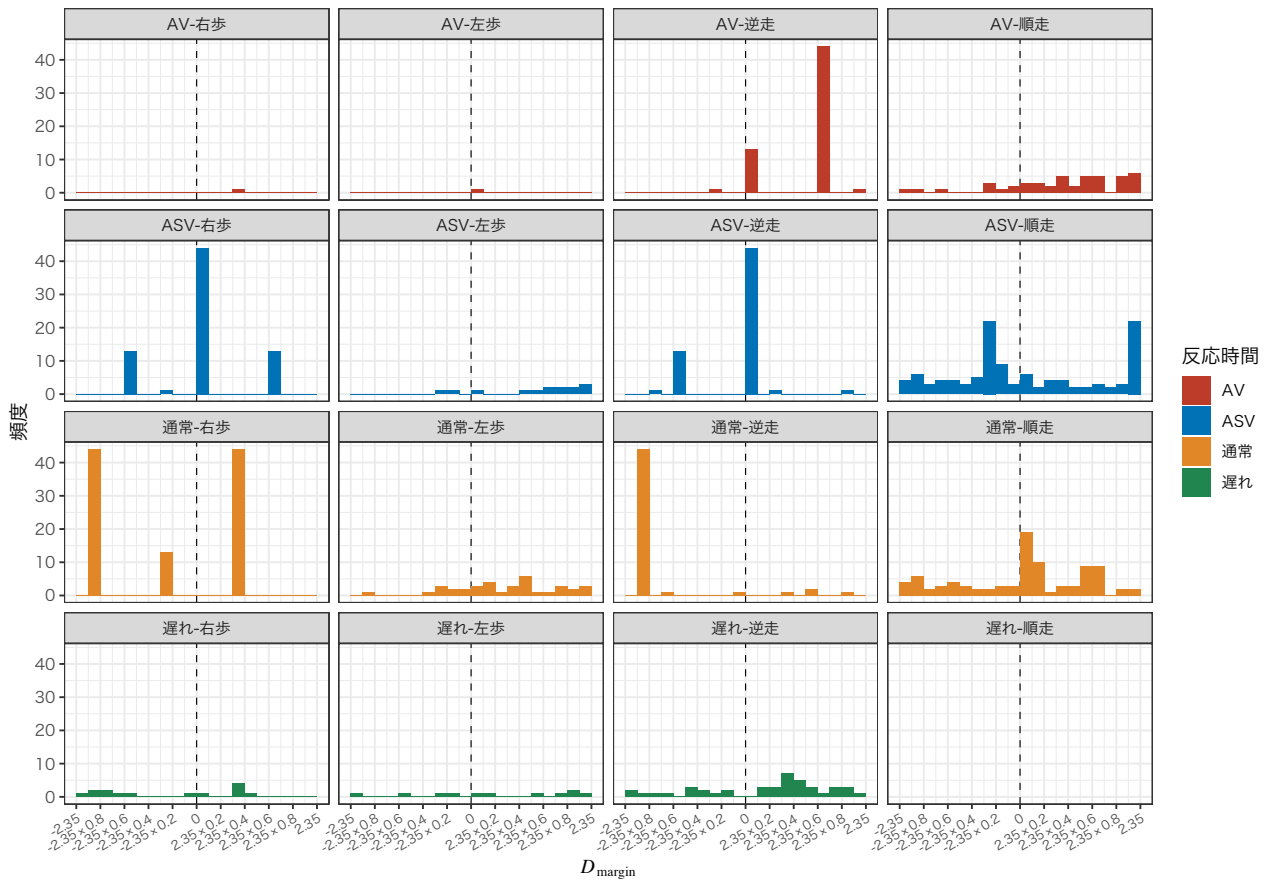


図7 反応時間と事故類型別の車両側余裕距離頻度分布

表5 低速域の衝突回避可能速度有無

反応時間と事故類型	危険判定数	低速域なし
AV-右歩	1	0
AV-左歩	1	1
AV-逆走	59	13
AV-順走	45	6
ASV-右歩	71	13
ASV-左歩	14	1
ASV-逆走	60	13
ASV-順走	113	11
通常-右歩	101	13
通常-左歩	36	2
通常-逆走	50	45
通常-順走	90	12
遅れ-右歩	14	0
遅れ-左歩	11	3
遅れ-逆走	42	1
遅れ-順走	0	0

- 「AV」：歩行者・自転車を発見後直ちに減速して止まろうとするが、止まりきれない場合に衝突する。歩行者に対して最も安全性が高い。逆走事故の危険度が高い。衝突回避可能速度が低速域にないケースは逆走13，順走6，左歩1の計20件
- 「ASV」：「AV」・「遅れ」の中間型の事故が多い。右歩と逆走事故の危険度が高い。衝突回避可能速度が低速域にないケースは右歩13，逆走13，順走11，左歩1の計38件
- 「通常」：「AV」・「遅れ」の中間型の事故が多い。右歩と順走事故の危険度が高い。衝突回避可能速度が低速域にないケースは逆走45，右歩13，順走12，左歩2の計72件
- 「遅れ」：発見後に減速が遅れた結果，衝突予定地点を通り過ぎてから停止する。自転車に対して最も安全性が高い。危険度の高い特定の事故類型はない。衝突回避可能速度が低速域にないケースは左歩3，逆走1の計4件

4. 議論

本研究では車両が法定速度30 km/hで走行した場合について，車両側余裕距離の考え方をを用いて実道路環境において生じる状況を考慮した分析を行った。また，法

3.3 反応時間別の分析結果

以上の分析によって得られた知見を反応時間別にまとめると，以下のとおりとなる。

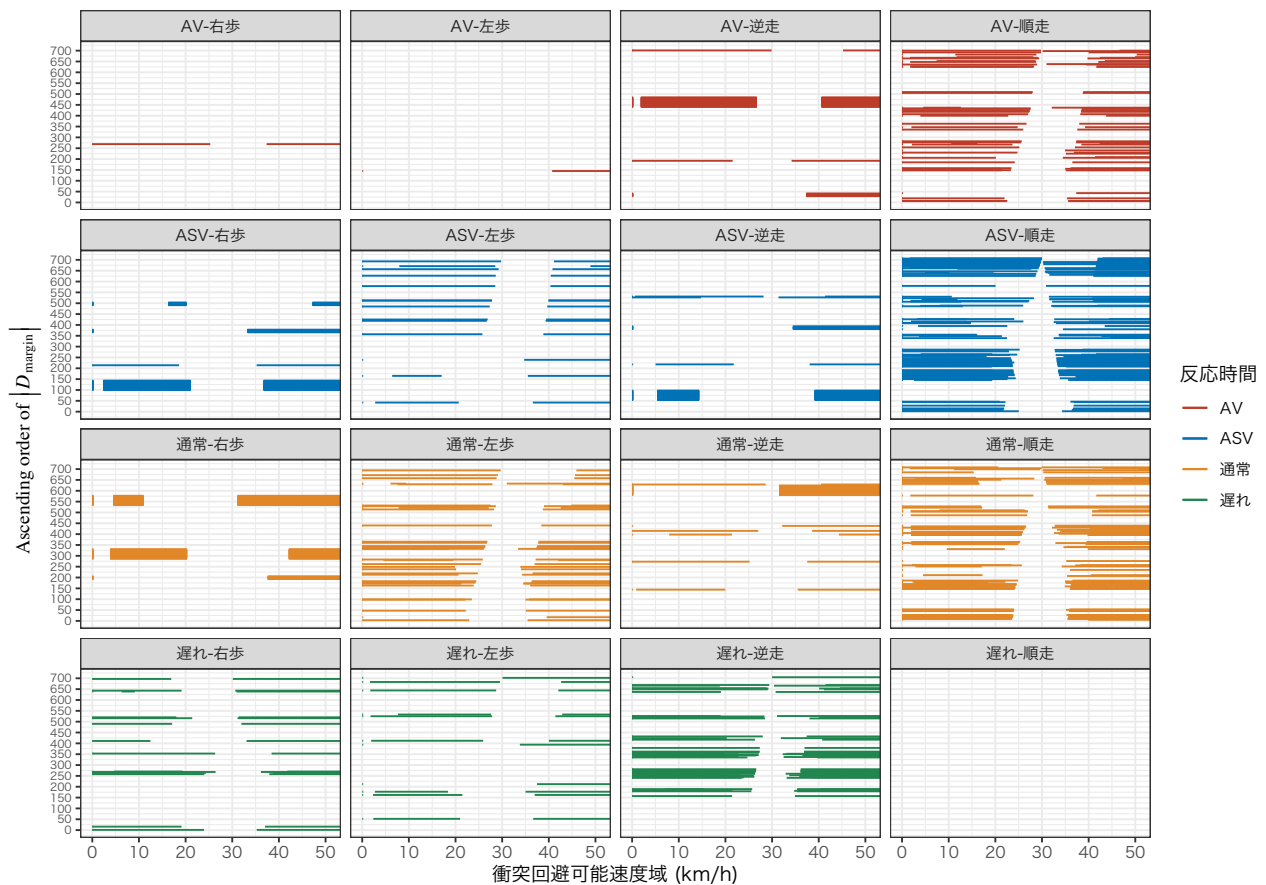


図8 反応時間と事故類型別の衝突回避可能速度域

定速度30 km/hでの走行では危険と判定されたケースについて、衝突回避可能な車両走行速度を算出した。この結果、

- 歩行者事故（表5の危険判定数，通常-右歩・左歩計137件とAV-右歩・左歩計2件の比較）は98.5%の減少，
- 自転車事故（表5の危険判定数，通常-順走・逆走計140件とAV-順走・逆走計104件の比較）は25.7%の減少，
- 歩行者事故（表5の衝突回避可能な低速域がないケース，通常-右歩・左歩計15件とAV-右歩・左歩計1件の比較）は93.3%の減少，
- 自転車事故（表5の衝突回避可能な低速域がないケース，通常-順走・逆走計57件とAV-順走・逆走計19件の比較）は66.7%の減少，

となり、自動運転車の導入によって分析対象地域の出会い頭事故に対する安全性の向上が期待できる結果となった。

また、

- 反応時間が0sで自転車・歩行者が見通せる位置に車両が進んだ瞬間に減速を開始すると仮定した「AV」であっても衝突回避不可能なケースがあること

- 反応時間が2.50sと他と比べて大きな「遅れ」が、総合的な安全性が高いこと

も明らかとなった。これより生活道路交差点部周辺での安全性確保には自動運転システムによる瞬時の減速開始だけでは不十分で、より早期に歩行者や自転車の存在を認知する方法（例えば、道路鏡や歩車・車車間通信などの活用など）や見通しの改善が必要なることが示唆される。ただし、以上の結果は2章で述べた仮定の下で導き出された限定的な結果であることに留意が必要である。具体的な本研究の限界点としては以下の3点が挙げられる。

- 1) 衝突可能性のみを評価対象としており、事故の深刻さに直接的に関係する衝突時の車両速度を評価していない
- 2) 衝突予定地点Cにおいて点で表された歩行者・自転車が自動車の側面に衝突する場合（ $-2.35\text{m} \leq D_{\text{margin}} \leq 2.35\text{m}$ ）のみを衝突の可能性があると判定し、歩行者・自転車の幅を考慮していない。また、歩行者・自転車が衝突予定地点Cの近傍を移動中で、かつ、自動車がCに到達直前のようなケースの衝突可能性を考慮していない
- 3) 歩行者・自転車・車両の速度や走行位置を確定的に扱い、これらの値のバラツキの影響を考慮していない

これらモデルの精緻化や評価指標の見直しについては、今後の課題となる。

次に先行研究で示された結果との比較をおこなう。筆者らの既報論文⁴⁾では歩行者の通行位置に着目して分析を行い、左側通行の方が安全性が高いことを示した。本研究で条件を追加した「AV」・「ASV」を含め、いずれの反応時間でも左側歩行の方が危険性が低いか等しい結果となり、既報論文の結果を支持するものとなった。また、高橋²⁾は自転車と四輪車の出会い頭事故200件の分析を行い、緊急自動ブレーキシステムが自転車を検知すると同時に制動を開始したと仮定した場合 ($t_r = 0$ sに相当)、出会い頭事故の衝突回避可能性が8割強あったと報告している。高橋の研究における初期反応時間が不明であり、また、本研究とは衝突判定条件も異なるため直接的な比較は難しいが、本研究では先述のとおり自転車事故は25.7%減少と高橋の結果に比べると低い効果であった。

反応時間別にみると、歩行者事故に対して最も安全性の高い反応時間は「AV」であり、自転車事故に対しては「遅れ」の安全性が最も高いことが分かった。しかし、現状を踏まえると、前者に関しては自動運転システムに対する過大な性能要求^{*5}となり、後者に関しては同等の性能をシステムに設定することは容易である反面、交通管理者・道路管理者の合意を得ることは難しい^{*6}であろう。ただし、「AV」と「遅れ」の自転車に対する安全性の差は低速域での衝突回避を加味すれば縮小する。自動運転車であれば低速域が狭かったり極端な低速であったりしたとしても、設定された速度を遵守可能である。以上より、生活道路への自動運転車導入に向けては見通しや幅員など地域ごとに異なる道路構造や交通環境を踏まえた適切な走行速度の設定が必要となるが、これも今後の課題としたい。

また、本研究では反応時間が4水準 (0s, 0.50s, 0.75s, 2.50s) で変動したときの生活道路における出会い頭事故の危険性を検討したが、自動運転システムに要求される性能を明らかにすることまでは至らなかった。今後、危険性を最小化する最適な反応時間を求める最適化問題としての定式化を試み、「生活道路での完全自動運転が可能な社会」実現に貢献したいと考えている。

補注

*1 本研究では幅員の狭い生活道路を検討対象としており、手動運転か自動運転かによらずハンドル操作で

回避することは困難と考える。

- *2 自転車の標準的な寸法は幅0.60mだが、これに走行に必要な余裕幅を見て占有幅は1.0mが基本となる。
- *3 人 (成人男子、荷物等なし) の物理的な幅は0.5m程度で、ある程度の余裕幅を見て占有幅は0.75mとされている。本研究で想定する幼児・児童は規定されていないため、成人男子に準ずるものとする。
- *4 各種センサから収集した値からシステムが減速開始の判断を0sで下すのは原理的に不可能である。
- *5 同上
- *6 本研究では衝突時の車両速度を考慮していないが、遅れでの衝突は減速が不十分なままの衝突となり、事故の深刻さが高いことが想定される。

参考文献

- 1) 高橋昭夫：ミクロ事故データを活用した四輪車の出会い頭事故の分析，自動車技術会論文集，Vol. 48, No. 6, pp. 1285–1290, 2017.
- 2) 高橋昭夫：自転車と四輪車の出会い頭事故，イタルダイノフォーメーション，交通事故総合分析センター，pp. 1–12, 2017.
- 3) 謝振宇，星野一輝，山本俊雄，小嶋文，久保田尚：歩行者・自転車事故の個別的事故分析に基づく自動運転の事故軽減効果計測手法等の研究開発，交通工学論文集，Vol. 6, No. 4, pp. A_63–A_70, 2020.
- 4) 長谷川裕修，伊藤菜，田村亨：生活道路の交差点部周辺における歩行者通行位置の安全性評価，交通工学論文集，Vol. 6, No. 2, pp. A_71–A_77, 2020.
- 5) 三谷哲雄，山中英生：細街路小交差点における自転車の通行挙動特性の把握，平成25年度公益財団法人タカタ財団助成研究論文集，公益財団法人タカタ財団，pp. 1–73, 2013.
- 6) 日本道路協会(編)：道路構造令の解説と運用 (改訂版)，丸善出版，平成16年版，2004.
- 7) 田中敦士，奥住秀之：小児歩行の発達的变化，*Equilibrium Research*, Vol. 55, No. 3, pp. 270–274, 1996.
- 8) 高島一彦，古池弘隆，森本章倫：交差点における自動車の走行特性からみた交通事故の潜在的危険性に関する分析，土木学会論文集，Vol. 716, No. IV-57, pp. 39–52, 2002.
- 9) 江守一郎：自動車事故工学，技術書院，1974.