

電動 1 人乗りモビリティと歩行者の混在交通下における主観的危険度のシミュレーション評価

井料 美帆¹・菱川 貴之²

¹正会員 名古屋大学准教授 環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail:iryoy@nagoya-u.jp

²正会員 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング株式会社
(〒461-8516 愛知県名古屋市東区葵 1-19-30 マザックアートプラザ)

E-mail: takayuki-hishikawa@murc.jp

道路交通法の改正により、電動 1 人乗りモビリティ (PMV) は走行速度に応じて走行区分が分離されることが見込まれる。一方で、免許の必要のない PMV は必ずしも走行区分通りに利用されるとは限らず、依然として歩行者と交錯する可能性は十分に考えられる。歩行者の物理的安全と安心感の両方を充足することは、PMV の普及検討において重要である。本研究では、歩行者と PMV の混在交通のシミュレーションモデルと、歩行者が PMV から受ける主観的危険度の推計式を組み合わせることで、歩行者交通量や歩道幅員、PMV の希望速度と歩行者の主観的危険度分布との関係を分析した。また、既存の客観的危険度分布と比較することで、主観的危険度は客観的危険度に比べると PMV の希望速度への感度が低く、歩道幅員への感度が大きいなど、主観と客観の危険度の特徴の違いを考察した。

Key Words: personal mobility vehicles, mixed traffic simulation, subjective risk

1. はじめに

電動キックボードをはじめとする電動 1 人乗りモビリティ (PMV) は、近年世界各地にて急速な普及が進んでいる。わが国でも「多様な交通主体の交通ルール等の在り方に関する有識者検討会」報告書¹⁾にて、速度に応じた PMV の走行位置区分の方法が提案され、本年可決された改正道路交通法でも速度に応じた車種・走行位置区分が提示されている。

しかし、走行区分を決めたといっても、実際の安全性が常に担保されるとは限らない。自転車歩行者道のように中速交通と歩行者が交錯する道路空間は数多く存在するうえ、運転免許のない PMV の運転者が必ずしも走行区分通りに利用するとは限らない。世界的にはシェアドスペースの導入検討の結果、中速交通と歩行者の混在による安全性の課題が顕在化している所^{2,3)}もあり、歩行者と混在する電動モビリティとの安全性確保は、以前重要な課題として認識されている。このように、走行区分を決めたとしてもなお、速度の異なる交通が混在する環境の受容性を検討する必要はあるといえる。

このような状況から、筆者らは PMV の 1 つであるセグウェイを対象として、交通シミュレータに基づく交錯

安全性評価⁴⁾を行った。これは、PMV と個々の歩行者が対面ですれ違う際の相対速度と相対距離を安全性評価指標として、道路幅員や歩行者交通量、PMV の自由走行速度等と安全性評価指標との関係性を分析した。しかし、物理的な交錯安全性が確保されたとしても、歩行者が感じる安心感は異なる可能性がある。PMV が受容される環境の構築には、客観的・物理的安全性と主観的な安全性の双方を満たす必要がある。

PMV から歩行者が受ける危険感については、Hasegawa et al.⁵⁾が一对一のセグウェイと歩行者との相対速度、位置と危険感との関係を定式化している。また、鈴木⁶⁾は、電動キックボードと自転車、歩行者がそれぞれ対面ですれ違うときの不安感の分析を行い、電動キックボードにおいても相対速度やすれ違い時の離隔等が利用者の不安に影響し、またその影響の感度が道路利用者の種類の組合せによって異なることを示した。しかしこれらはいくまで一对一の回避を扱っており、実道で歩行者交通量が大きくなった時の危険感を扱っていない。菱川・井料⁷⁾は、仮想空間の歩行実験を通じて、歩行者交通流の中を PMV が混在して走行する場合の歩行者の危険感が、道路幅員や周辺歩行者等による移動の自由度にも影響を受けることを明らかにした。しかしこれも、あ

くまで交通流の中に存在する歩行者の 1 人がたまたま経験した交錯に基づく評価であり、道路空間全体として各歩行者が受ける主観的危険度の分布の特徴を調べたものではない。

そこで、本研究では、歩行者と PMV が交錯する際の、歩行者の主観的危険度評価と、道路幅員や PMV の挙動との関係を明らかにすることを目的とする。具体的には、Hishikawa and Iryo-Asano⁴⁾による歩行者—PMV 混在交通シミュレーションの出力結果に主観的危険度評価指標⁷⁾を適用し、PMV の挙動条件や道路幅員等の条件と主観的危険度評価指標との関係を求める。また、既存研究において求めた客観的危険度評価との違いについても考察する。

2. 危険度評価指標

(1) 主観的危険度評価指標

本論文では、菱川・井料⁷⁾の提案した主観的危険度評価指標を用いて、個々の歩行者が PMV から受ける危険度を評価する。この指標は、歩行者が PMV との位置関係や道路幅員、周辺歩行者との移動制約により決められる順序ロジスティック回帰モデルである。モデルの元データは、仮想空間における歩行者と PMV の回避実験の中で、歩行者が PMV との回避時に感じる危険度を 7 段階評価（安全：1～危険：7）したアンケート結果である。個々の歩行者の主観的危険度 SR も 1～7 の 7 段階のスコアで、以下の式にて表現される。

$$SR = f(sr) = \begin{cases} 1 (sr < \delta_1) \\ 2 (\delta_1 \leq sr < \delta_2) \\ 3 (\delta_2 \leq sr < \delta_3) \\ 4 (\delta_3 \leq sr < \delta_4) \\ 5 (\delta_4 \leq sr < \delta_5) \\ 6 (\delta_5 \leq sr < \delta_6) \\ 7 (\delta_6 \leq sr) \end{cases} \quad (1)$$

$$sr = 3.96\exp(-r_c) + 0.874v_c - 0.0954ATTC + 3.89 OR_w + 1.59 OR_p \quad (2)$$

ここに、 r_c ：対象歩行者と PMV との最接近時距離[m]、 v_c ：最接近時相対速度[m/s]、 $ATTC$ ：回避時衝突余裕時間[秒]、 OR_w ：自由歩行領域に対する壁占有率、 OR_p ：自由歩行領域に対する対向歩行者占有率である。 $ATTC$ は、対象歩行者と対面から接近する PMV の横方向回避が完了する直前の時刻における両者の位置を、両者の相対速度で除したものである。占有率は、何も障害がないときに歩行者が自由に歩ける領域の面積に対して、他者によ

ってその歩行を妨害された領域の面積の割合と定義する。閾値 $\delta_1 \sim \delta_6$ は表-1の通りである。

式(1),(2)は、個々の歩行者や PMV の詳細な挙動が判明して初めて利用可能なモデルであり、このモデルを直接実際の道路空間の評価に適用するのは困難である。以降では、交通シミュレーションの出力結果としての個々の歩行者・PMV の挙動に本モデルを適用し、道路・交通環境ごとの個別の歩行者の危険度の分布を調べる。

表-1 順序ロジスティック回帰の推計値⁷⁾

δ_1	δ_2	δ_3	δ_4	δ_5	δ_6
1.88	2.81	3.61	4.16	5.60	7.36

(2) 客観的危険度評価指標

比較対象として、Hishikawa and Iryo-Asano⁴⁾が用いた客観的危険度評価指標を使用する。これは、交錯リスクが一般論として交錯確率と強度の積で表現されることに着目したうえで、交錯確率の代替指標を $\exp(-r_c)$ 、交錯強度を v_c とみなし、客観的危険度指標を両者の積 $v_c \exp(-r_c)$ としたものである。主観的危険度とは異なり、あくまで歩行者と PMV が物理的に衝突する確率と衝突した時の衝撃の強さを表現する指標である。

3. 交通シミュレーションとシナリオ設定

本研究では、Hishikawa and Iryo-Asano⁴⁾が検討した歩行者—PMV 混在交通シミュレーションによる移動軌跡データと同じものを用いる。シミュレーションモデルは Dias et al.⁸⁾によるセグウェイを対象とした Social Force に基づくモデルである。ここでは、上述の論文における設定の概略を述べる。

(1) シミュレーションの構成

図-1に対象となる通路を示す。長さ 90m の通路の両側から歩行者交通を発生させ、その中に PMV が 1 台だけ混入する。このうち、中央の 50m ののみを観測対象とする。Social Force では移動体間に反発力を発生させるが、歩行者同士の反発力、PMV が歩行者から受ける反発力、歩行者が PMV から受ける反発力は、それぞれ Dias et al. により実観測データからキャリブレートされたパラメータを用いている。

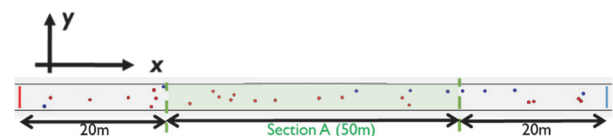


図-1 シミュレーション区間の概略図

表-2 シナリオ設定

変数	設定値
歩行者交通量 (人/分/断面)	2, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 32, 40
歩道幅員 (m)	2, 2.5, 3, 4
PMV の希望速度 (km/h)	3.6, 4.7, 6, 10, 15
反発力パラメータ	デフォルト値 (1.72) の 0.5 倍, 1 倍, 2 倍

(2) シナリオ設定

歩行者交通量, 歩道幅員, PMV の希望速度, PMV が歩行者から受ける反発力の強さをシナリオの変数とした。表-2に, これらの変数の設定値を示す。これらの設定値を組合せ, 全 540 パターンのシナリオ計算を実施した。反発力のパラメータを大きくすると, PMV は歩行者を遠くから余裕をもって回避しやすくなり, 小さくすると PMV は歩行者に近づくまで回避行動をとらなくなる。ここでは Dias et al.が観測値からチューニングしたデフォルト値(=1.72), およびその半分と 2 倍の 3 種類のパターンを設定した。

各シナリオの計算は, 10 分間のウォームアップタイムを含む 70 分間連続とし, シミュレーション開始後 10 分後以降に発生した歩行者を対象に主観的危険度モデルを適用した。

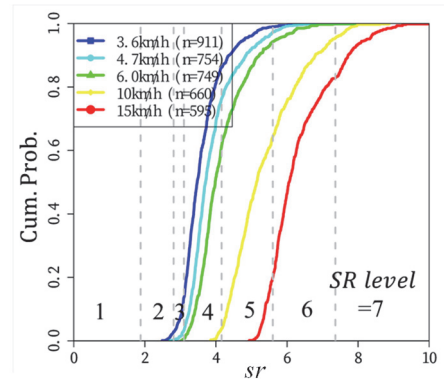
4. シミュレーション結果への主観的危険度適用結果

(1) 主観的危険度評価値の分布特性

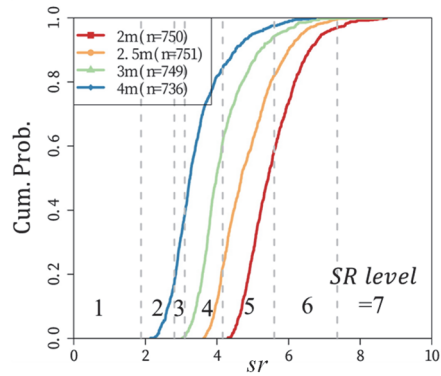
図-2は, 各設定値の感度分析を行ったもので, 個々人の sr 算出値を累積分布で示したものである。図中の破線は 7 段階評価の SR の閾値を示している。設定値の基本ケースは, 歩道幅員 3m, 歩行者交通量 16人/分, PMV の希望速度 6km/h, 反発力パラメータはデフォルト値とし, 各感度分析では, 感度を見る変数以外はこれら基本ケースの値に固定している。

PMV の希望速度が増加し, 歩道幅員が狭くなると, sr の分布は危険側に移動する。時速 6km では SR が 4 以下の人の割合が 6 割程度であるが, 時速 10km になるとほとんどの人が $SR5$ 以上となっており, 主観的に見て危険寄りに感じる人の割合が急速に増加する。同様に, 幅員が 3m よりも狭くなると, 主観的にやや危険と感じる人の割合が増加する。これらに比べると, 交通量や反発力パラメータの値の影響は小さいが, 交通量が大きくなるほど sr の分散が大きくなることで SR が 6 以上の危険と感じる人の割合が増え, 反発力パラメータが小さくなると sr が大きくなる事が分かる。

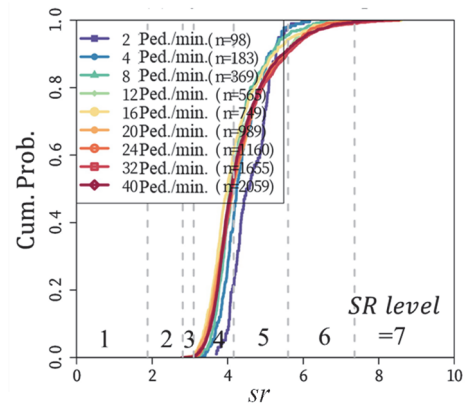
参考比較として, 図-3に同様に客観的危険度の累積分布を示す。客観的危険度と主観的危険度は指標の単位が



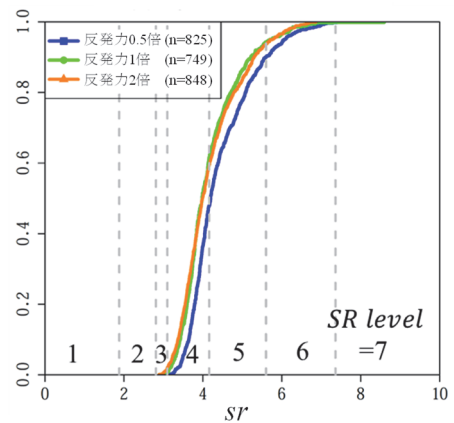
(a) PMV 希望速度別



(b) 幅員別

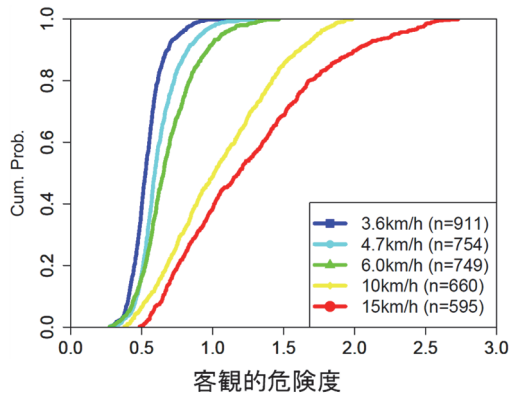


(c) 歩行者交通量別

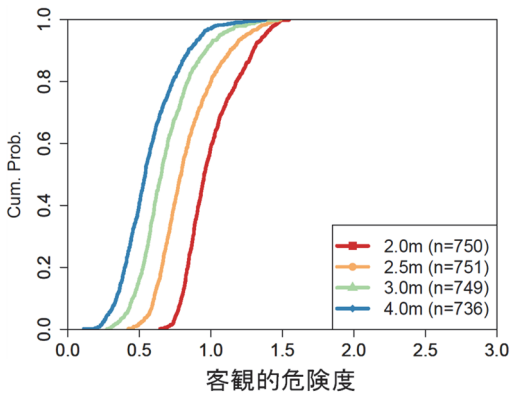


(d) 反発力パラメータ別

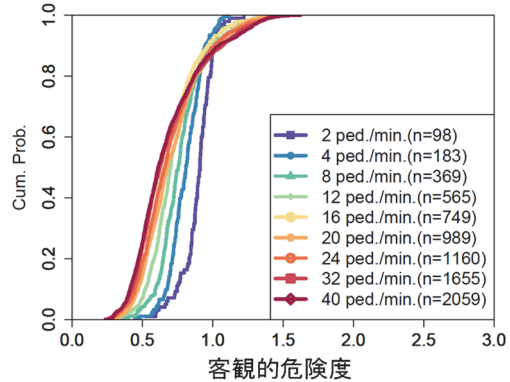
図-2 SR の分布の感度分析



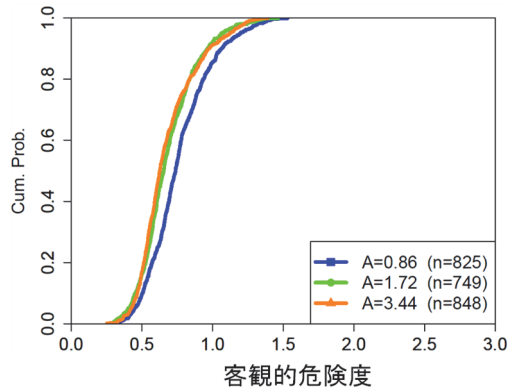
(a) PMV 希望速度別



(b) 幅員別



(c) 歩行者交通量別



(d) 反発力パラメータ別

図-3 客観的危険度の分布の感度分析⁴⁾

表-3 sr 85 パーセンタイルの回帰分析

変数	係数	z 値
定数項	6.94	114 ***
反発力パラメータ	-0.142	-9.33 ***
log(歩行者交通量) (人/分/m)	-0.254	-9.76 ***
歩道幅員 (m)	-1.03	-83.0 ***
PMV 希望速度 (m/s)	0.827	58.8 ***
(反発力パラメータ) × log(歩行者交通量)	0.0476	5.59 ***
log(歩行者交通量) × PMV 希望速度	0.149	18.9 ***
補正 R ²	0.981	
p	<<0.001	
サンプル数	540	
対数尤度	93.52	

***: $p <= 0.001$

異なり、単純に比較することは困難であるが、主観的危険度は傾向としては客観的危険度に類似している。また客観的危険度では希望速度の高い PMV に対する危険度のばらつきが大きい、主観的危険度では全体的に危険度が増加しており、物理的接触の少ない人でも危険を感じるものが反映されているものと考えられる。

(2) 主観的危険度の回帰分析

交通シミュレーションの各ケースの主観的危険度を代表する指標として、 sr の累積分布の 85 パーセンタイル値を取り、その値と各入力変数との関係について最尤法による線形回帰分析を行った。その結果を表-3に示す。

交互作用項として、反発力パラメータと歩行者交通量、歩行者交通量と PMV の希望速度の積をそれぞれ考慮した。交通量については、単位断面長当たりとした。

反発力と歩行者交通量は、それぞれ個別の項だけを見ると、反発力や交通量が大きくなるほど主観的危険度の 85 パーセンタイル値が減少する。しかし、例え PMV の反発力が大きくても歩行者交通量が大きいと、PMV は 1 人の歩行者を回避しても他の歩行者を避けることができず、結果として危険度はさほど低下しない。この交互作用はそのような状態を表現しているといえる。

歩道幅員が増加すると主観的危険度は減少し、PMV の希望速度が増加すると危険度も増加する。さらに、交通量と PMV 希望速度の交互作用項が正であることから、歩行者交通量が多い時には、PMV の希望速度の影響が更に危険度に影響することが見てとれる。

5. 客観的危険度との比較・考察

(1) 標準偏回帰係数による推定結果比較

Hishikawa and Iryo-Asano による客観的危険度の 85 パー

センタイル値の回帰分析結果と、前章の主観的危険度の結果との比較を行う。客観的危険度と主観的危険度は、指標の次元が異なり、単純に数値を比較することはできない。そこで、両者の標準偏回帰係数を表-4に示す。両者の回帰式では同一の説明変数を用いており、標準偏回帰係数の比較により、主観/客観的危険度への各変数の影響の違いを見ることができると考えられる。

両者に共通して最も係数が大きいのは PMV の希望速度であり、特に客観的危険度においてその影響がより大きい。歩道幅員はその次に影響が大きく、特に主観的危険度にてより感度が高い。歩行者交通量は、それ単体よりも、PMV 希望速度との交互作用としての影響が強いことが分かる。またその影響は、客観的危険度の方が大きい。

(2) 等高線図を用いた視覚的比較

交互作用を含めた各指標の影響をより直感的に見るために、PMV の希望速度と歩道幅員を xy 軸にとり、歩行者の交通量別に主観的・客観的危険度モデルの推定結果を等高線図に表現したのがそれぞれ図-4,5である。反発力パラメータはデフォルト値とした。希望速度と歩道幅員の軸の範囲は、今回シミュレーションにて計算した範囲であり、現実性の高い設定範囲と考えている。

図-4の主観的危険度は、同じ色の等高線で囲まれる範囲が、同じ危険度レベルであることを示している。この図の範囲では主観的危険度はほとんどが5以上となっている。この指標は同じ交通環境を経験する全歩行者の危険度のうちの 85 パーセント値を取っているため、より危険側の値になりがちである。数値はあくまで相対的な評価であり、受容可能な数値の範囲についてはここでは検討しない。この図の右下、すなわち PMV の速度が高く、幅員が狭いほど危険度は高まる。交通量の増減への感度は、幅員が広いほど、また PMV の希望速度が高いほど大きくなり、これらの交互作用が視覚的に明示されていることが見て取れる。

図-5の客観的危険度では、等高線上に示した値がその線の危険度の値を示す。等高線の傾きが全体的に主観的危険度よりも大きく、PMV の希望速度に比べて相対的に歩道幅員の感度が低いことがわかる。このように、物理的・客観的な危険度と、歩行者が感じる主観的な危険度の感度の違いを表現することにより、双方を満たすための PMV の速度や歩道幅員の要件を検討することが可能となると考えられる。

6. おわりに

本研究では、既存研究で求めた個々の歩行者の主観的

表-4 主観的・客観的危険度 85 パーセント値の標準偏回帰係数

変数	主観的危険度	客観的危険度
反発力パラメータ	-0.051	-0.067
log(歩行者交通量) (人/分/m)	0.108	0.089
歩道幅員 (m)	-0.508	-0.301
PMV 希望速度 (m/s)	0.817	0.909
(反発力パラメータ) × log(歩行者交通量)	0.033	0.046
log(歩行者交通量) × PMV 希望速度	0.112	0.182
補正 R ²	0.981	0.978
p	<<0.001	<<0.001
サンプル数	540	540

***: p<=0.001

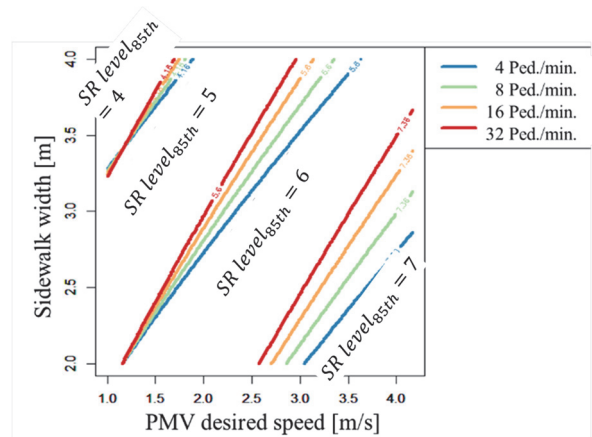


図-4 主観的危険度 85 パーセント値の推定結果の等高線図

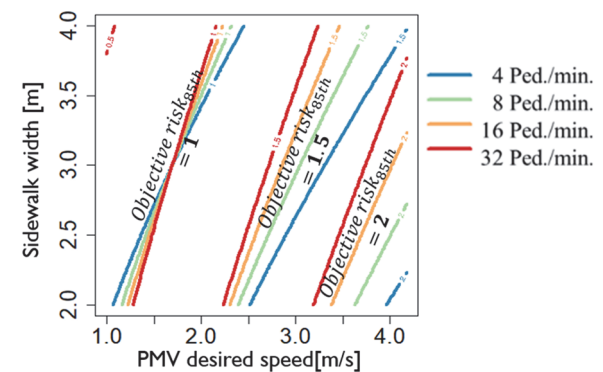


図-5 客観的危険度 85 パーセント値の推定結果の等高線図

危険度評価指標の推定式を歩行者-PMV 混合交通シミュレーションの個別の挙動に適用することにより、歩道幅員や PMV の希望速度等に応じた主観的危険度の分布を算出した。そして、主観的危険度分布の 85 パーセント値をその道路環境の危険度の代表値とみなし、これと道路交通環境条件との関係を線形回帰モデルで推定

した。

主観的危険度と客観的危険度の比較により、主観的危険度は客観的危険度よりも PMV の希望速度への感度が小さいこと、道路幅員の感度が大きいことが示された。また、歩行者交通量や PMV の希望速度は、それ単体ではなく、交互作用による複合的な影響があることも示された。

本研究のシミュレーションアプローチは、交錯安全性に対する各種道路環境の影響を評価するのに有効と考えられる。一方で、あくまで交通シミュレーションによる評価のため、結果はシミュレーションの再現性に依存することに注意が必要である。またこのシミュレーションでは PMV の走行位置は定められておらず、歩道上を自由に走行することを前提としている。車道側に寄って走行するなど、運用形態の違いによる影響の検討は今後の課題である。今回の PMV は、背景となる既往研究がいずれもセグウェイを対象としていたため、セグウェイを想定した評価である。電動キックボードなどの他の車種では、走行性能に応じた挙動モデルの導入も求められる。

今回適用した主観的危険度指標は PMV と歩行者がすれ違う時の推計式であり、PMV の追い越し挙動による危険度は考慮されていないため、より一般的な指標の検討も必要である。

参考文献

- 1) 警察庁：「多様な交通主体の交通ルール等の在り方に関する有識者検討会」報告書，2021.
- 2) Liang, X., Meng, X. and Zheng, L.: Investigating conflict behaviours and characteristics in shared space for pedestrians, conventional bicycles and e-bikes, *Accident Analysis & Prevention*, Vol.158, 106167, 2021.
- 3) Gkekas, F., Bigazzi, A. and Gill, G.: Perceived safety and experienced incidents between pedestrians and cyclists in a high-volume non-motorized shared space, *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, Vol. 4, 100094, 2020.
- 4) Hishikawa, T. and Iryo-Asano, M.: Safety Evaluation of Personal Mobility Vehicles and Pedestrians under Mixed Traffic Flow using Traffic Simulation, *Asian Transport Studies*, Vol. 8, 100049, 2022.
- 5) Hasegawa, Y., Dias, C., Iryo-Asano, M. and Nishiuchi, H.: Modeling pedestrians' subjective danger perception toward personal mobility vehicles, *Transportation Research Part F*, Vol. 56, pp. 256-267, 2018.
- 6) 鈴木一史：電動キックボードすれ違い時の交錯回避特性と利用者不安感の分析，第 64 回土木計画学研究・講演集，2021.
- 7) 菱川貴之，井料美帆：パーソナルモビリティと歩行者の混在交通における危険度評価指標の提案，土木学会論文集 D3, Vol. 77, No.5, p.I_893-903, 2022.
- 8) Dias, C., Iryo-Asano, M., Nishiuchi, H. and Todoroki, T.: Calibrating a social force based model for simulating personal mobility vehicles and pedestrian mixed traffic. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 87, 395-411, 2018. (2022. 9. 30 受付)

SIMULATION-BASED EVALUATION OF SUBJECTIVE RISK LEVEL UNDER MIXED TRAFFIC OF A PERSONAL MOBILITY VEHICLE AND PEDESTRIANS

Miho IRYO and Takayuki HISHIKAWA