

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究状況報告書（2年目の研究対象）】

①研究代表者	氏名（ふりがな）		所属		役職	
	なかむら ひでき 中村 英樹		名古屋大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻		教授	
②研究 テーマ	名称	改良対策立案のための交差点安全性評価シミュレータの研究開発				
	政策 領域	[主領域] 【領域6】 交通事故対策	公募	Ⅱ		
		[副領域] —	タイプ			
③研究経費（単位：万円）	平成24年度	平成25年度	平成26年度	総合計		
※H24は精算金額、H25は受託金額、H26は計画額を記入。端数切り捨て。	1,025万円	1,299万円	1,399万円	3,723万円		
④研究者氏名	（研究代表者以外の主な研究者の氏名、所属・役職を記入。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）					
氏名	所属・役職					
井料(浅野) 美帆	東京大学生産技術研究所・講師					
鈴木 弘司	名古屋工業大学大学院・准教授					
浜岡 秀勝	秋田大学・准教授					
⑤研究の目的・目標	<p>本研究開発では、信号交差点において事故発生と関連性の高い信号切り替わり時の車両や歩行者の駆け込み進入などの危険挙動、速度変化、軌跡変化などに着目し、それらの挙動のばらつきを利用者の心理的要因をはじめ、交差点の道路構造、信号制御などの環境要因から解明する。そして、これら車両や歩行者の動態を詳細に再現可能な交差点安全性評価シミュレータを開発することで、交差点構造および信号制御を変更したときの利用者挙動の変化を時空間的に再現することにより、交差点改良代替案の安全性能を事前かつ定量的に評価する手法を開発することを目的とする。</p>					

⑥これまでの研究経過

1. 平成24年度

初年度はFS研究として、主に左折車両の車両軌跡、速度変化と横断歩行者の横断軌跡、横断速度について確率的にモデル化を行い、左折車両と横断歩行者の交錯に関する安全性評価を実施した。また、交差点構造や信号制御条件を入力することで、モデル化した各挙動を再現し、安全性評価指標を出力可能とするマイクロシミュレータを開発し、交差点改良のケーススタディを実施した。

2. 平成25年度

右折専用現示における右折車両挙動と横断歩行者挙動を主な研究対象とし、下記成果が得られた。

(1)交差点挙動実態観測調査

昨年調査を実施した6箇所の信号交差点に加え、右折専用現示における右折車両を対象に、幾何構造や制御条件の異なる4箇所の交差点で実態観測調査を行い、利用者挙動データを収集した。

(2)左折車両挙動に関する分析

1)先頭車と追従車の挙動比較

青現示開始のタイミングと車両走行位置から走行挙動を4つに分類し、走行速度と走行軌跡に関する比較検討を行った。結果として、速度変化は先頭車や横断歩行者との間隔により減速や停止を繰り返すため個別車両ごとに異なる(図1)が、走行軌跡は概ね類似することが明らかとなった。

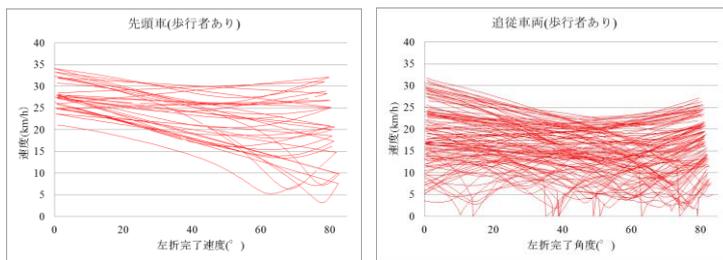


図1 先頭車と追従車の走行速度比較

表1 左折車両並列走行率モデル

説明変数	係数	t 値
歩行者交通量	3.87×10^{-4}	10.26**
流出側車線数	3.43×10^{-2}	6.73**
定数項	-1.02×10^{-1}	-6.57**
R		0.94
R^2		0.89
\bar{R}^2		0.88
サンプル数		37

2)交差点内での並列走行に関する分析

左折車の交差点内での並列走行挙動に着目し、並列走行率を被説明変数とする重回帰分析の結果(表1)から、並列走行には流出側車線数と歩行者交通量が強く関係していることを明らかにした。

(3)右折専用現示における右折車両挙動の分析とモデル化

1)右折専用現示前の通過/停止判断

現示切り替わり時の通過/停止判断について、黄開始時における停止線からの走行位置と接近速度の関係(図2: X-V図)を分析し、停止領域において通過判断をしている車両の存在や、赤開始時間を判断基準としている可能性があることを確認した。また、黄開始時の通過/停止判断をバイナリロジットモデルにより表現し、停止線通過までの所要時間や停止線セットバック量等が停止判断にプラスに作用するモデル(表2)を構築した。

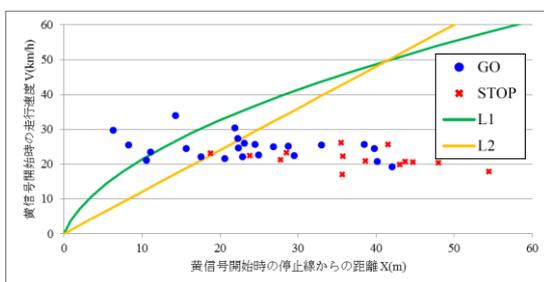


図2 通過/停止判断と X-V 図

表2 右折専用現示での停止選択モデル

説明変数	係数	t 値
黄開始時の停止線までの所要時間[s]	9.18×10^{-1}	8.07**
停止線セットバック量[s]	9.07×10^{-2}	3.27**
交差角度[deg]	-1.13×10^{-2}	-1.50
定数項	-5.13	-5.55**
$\bar{\rho}^2$		0.360
的中率		82.7%
サンプル数		306

2)右折専用現示前後の発進挙動

右折専用現示前の先頭右折車両や右折専用現示後の交差側直進車両について、発進反応時間(Start-up Response Time; SRT)の分布(図3)を確認し、交差点構造によりSRT分布が異なることを明らかにした。SRT分布がワイブル分布に従うと仮定した発進反応時間推定モデル(表3)を構築し、交差点規模や信号現示時間により発進反応時間が確率的変動を伴って変化することを表現した。

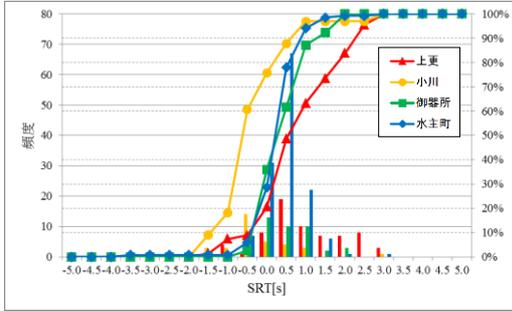


図3 右折車のSRT分布

表3 専用現示における右折車のSRT推定モデル

パラメータ	説明変数	係数	t 値
α	大型車ダミー	5.08	1.97*
	定数項	7.64	6.89**
β	停止線セットバック量[m]	-4.66×10^{-2}	-5.63**
	定数項	9.04	7.65**
γ	全赤時間[s]	8.16×10^{-2}	2.26**
	定数項	7.31	6.22**
$\bar{\rho}^2$			0.161
サンプル数			323

3)走行速度

専用現示における右折車の速度モデルは、速度プロファイルを、最小走行速度となる時刻を境界点として流出側と流入側の2つに分割し、各々を3次関数曲線で近似することにより表現した(図4)。流出入時の速度と加速度の各係数は所与とし、プロファイルの概形を決定する3次係数 $C_{1,in}$, $C_{1,out}$ と、最小速度とその時点での位置を推定することにより、速度プロファイルを特定した。

3次係数 $C_{1,in}$, $C_{1,out}$ はガンマ分布を仮定し、また、最小速度とその時点の位置については正規分布を仮定してそれぞれパラメータを推定した結果、表4および表5に示すように流入速度と交差角度、IP点から中央分離帯までの距離が走行速度に影響を与えていることが明らかとなった。

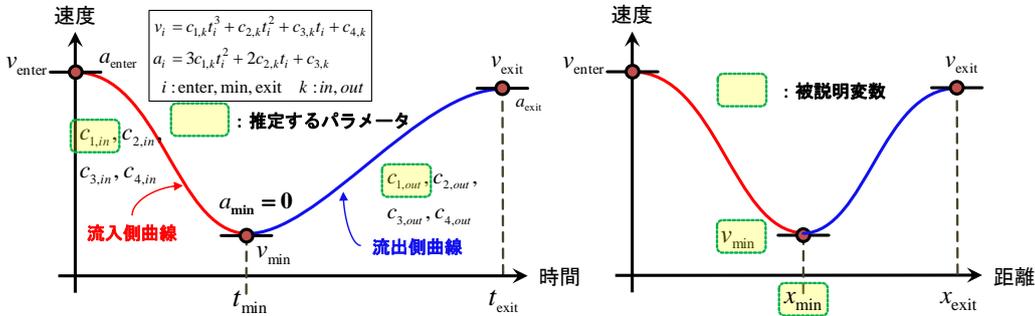


図4 速度プロファイルの特定方法

表4 速度プロファイルパラメータの推定結果

	説明変数	流入側 $C_{1,in}$	流出側 $C_{1,out}$
α	流入速度[m/s]	3.20×10^{-1} (4.67**)	2.75×10^{-2} (1.75)
	交差角度[deg]	-1.50×10^{-2} (-2.85**)	1.08×10^{-2} (2.51*)
β	交差角度[deg]	3.34×10^{-4} (5.52**)	2.28×10^{-4} (3.06**)
	流出側中央分離帯までの距離[m]	—	2.22×10^{-3} (5.00**)
対数尤度		149.81	192.78
サンプル数		84	89

表5 最小速度と最小速度位置の推計結果

	説明変数	最小速度	V_{min} 位置
μ	流入速度[m/s]	4.88×10^{-1} (14.13**)	9.17×10^{-1} (4.27**)
	交差角度[deg]	2.36×10^{-2} (4.37**)	1.50×10^{-1} (3.28**)
	流入側中央分離帯までの距離[m]	3.25×10^{-2} (2.96**)	2.18×10^{-1} (2.96**)
σ	流入速度[m/s]	2.61×10^{-2} (1.91)	-4.38×10^{-1} (-2.26*)
	交差角度[deg]	6.89×10^{-3} (2.74**)	9.75×10^{-2} (2.38*)
	流入側中央分離帯までの距離[m]	—	1.01×10^{-1} (1.75)
対数尤度		-103.32	-273.07
サンプル数			84

4) 走行軌跡

昨年度モデル化した左折車両と同様に、走行軌跡を円弧とクロノイドで近似し、各線形要素を走行速度と交差点構造要素から推定するモデルを構築し、右折時の最小走行速度やIP点から中央分離帯までの距離が走行軌跡の影響要因となっていることを明らかにした(表6)。また、円弧パラメータの確率分布にワイブル分布を与えることにより、交差点流入部ごとのばらつきの違いをより的確に表現し、柔軟性の高いモデルとした(図5)。

表 6 走行軌跡の線形要素推定モデル

説明変数	クロノイド A_1	円弧 R_{min}	クロノイド A_2
最小速度[m/s]	9.85×10^{-1} (2.76**)	2.08 (5.66**)	6.11×10^{-1} (3.01**)
交差角度[deg]	—	2.03×10^{-1} (6.61**)	—
最小半径[m]	1.86×10^{-1} (3.24**)	—	3.13×10^{-1} (4.69**)
流入側中央分離帯までの距離[m]	2.35×10^{-1} (5.93**)	—	—
流出側中央分離帯までの距離[m]	—	—	1.88×10^{-1} (1.74)
中央分離帯までの距離の最小値[m]	—	1.05×10^{-1} (1.41)	—
定数項	6.09(2.76**)	-13.0(-3.35**)	6.81(1.83)
R^2	0.416	0.393	0.366
サンプル数			136

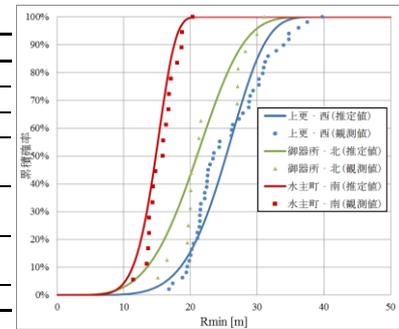


図 5 最小曲線半径の累積分布

(4) 横断歩行者挙動の分析とモデル化

1) 横断軌跡と速度のモデル化

前年度研究における歩行者の横断軌跡、速度モデルが、横断開始位置・中間点・横断終了位置の3断面で区分して、進行方向や速度を断面位置にて変化させるマクロモデルであったのに対し、今年度はSocial forceモデルを導入し、道路構造や交通状況および他者からの影響により時々刻々横断挙動が変化するミクロ行動モデルに改良した。適用したSocial Forceモデルは、個人の横断挙動が、理想とする目的地や横断速度に近づくための推進力と、他者や通行位置等との関係から生まれる相互作用(引力/斥力)より導かれると仮定したモデルである。

本研究では、通常、単路部や通路の歩行者挙動に用いられている本モデルを信号交差点に適用するにあたり、群衆/個別歩行者に対する反応($\vec{F}_{pedestrian}$)、接近車両に対する反応($\vec{F}_{vehicle}$)(後述)、極力横断歩道上を通行しようとする作用($\vec{F}_{boundary}$)、歩行者用信号の青点滅時/赤点灯時における反応(\vec{F}_{signal})を横断歩行者個人に作用する力として表現した。

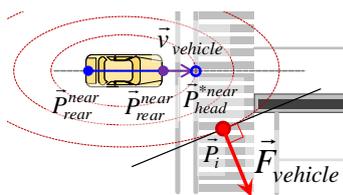
これより、横断軌跡と速度は、Social forceの合力および Δt 秒前の速度、位置ベクトルを用いて逐次算出することが可能となった。

$$\begin{aligned} \text{時刻 } t_k \text{ に歩行者に作用する Social force; } \vec{F}(t_k) &= \vec{F}_{driving} + \vec{F}_{pedestrian} + \vec{F}_{vehicle} + \vec{F}_{boundary} + \vec{F}_{signal} \\ \rightarrow \text{個人 } i \text{ のもつ速度ベクトルと作用する Social force の合力; } \vec{v}_i(t_k) &= \vec{v}_i(t_k) + \vec{F}(t_k) \Delta t \\ \rightarrow \text{個人 } i \text{ の時刻 } t_{k+1} \text{ における位置ベクトル; } \vec{P}_i(t_{k+1}) &= \vec{P}_i(t_k) + (\vec{v}_i(t_k) + \vec{v}_r(t_k)) \Delta t / 2 \end{aligned}$$

2) 車両の接近に伴う横断歩行者の反応

交錯車両の接近に伴う横断歩行者への反応作用は、1)に記載したとおり $\vec{F}_{vehicle}$ としてSocial forceに内包した。モデル化においては、接近する右左折車両の位置・速度ベクトル量に応じた斥力が歩行者に作用するものとして表現した(図6)。

$$\vec{F}_{vehicle} = A_v \exp(-B_v b_v) \cdot \vec{n}_{vi}$$



$$b_v = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\|\vec{P}_i - \vec{P}_{rear}^{near}\| + \|\vec{P}_i - \vec{P}_{head}^{near}\| \right)^2 - \left(\|\vec{P}_{rear}^{near} - \vec{P}_{head}^{near}\| \right)^2}$$

$$\vec{P}_{head}^{*near} = \vec{P}_{head}^{near} + \vec{v}_{vehicle} \Delta t$$

A_v, B_v : 強度係数

\vec{n}_{vi} : 接近車両により生じる力の接線に対し垂直な正規化ベクトル

図 6 車両の接近に伴う横断歩行者の反応

(5) シミュレータの性能検証

1) 利用者挙動の再現性検証

構築した各挙動モデルをシミュレータに実装し、各主体の軌跡(図6, 図8)や速度(図7), 主体間の交錯に関する指標(交錯点分布, PET, 交錯点通過速度等)についての再現性を検証し、各挙動とも一定の再現性を確保していることを確認した。

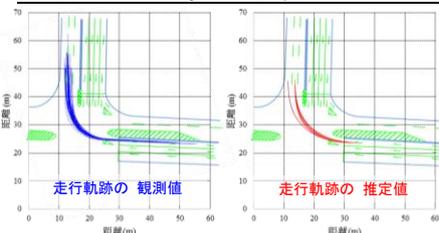


図6 右折車走行軌跡の検証

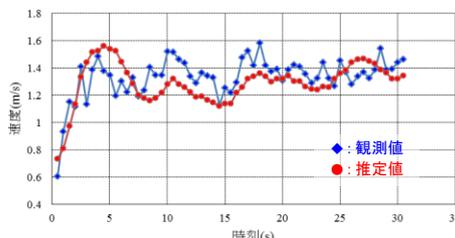


図7 歩行者速度の検証



図8 歩行者軌跡の検証

2) 安全性評価指標の妥当性検証

安全性評価のための代替性安全指標(SSM)に関する知見を整理し、着目する主体に応じた適切なSSMを選定した。車両対車両の交錯評価においては、安全性を交錯頻度と交錯強度の両面から捉える新たな評価指標(Conflict Index: CI)を考案し、事故発生件数との関係性について確認した。

現在、交差点構造や制御条件の変化がSSMに与える影響について、ケーススタディによる感度分析を実施中である。

$$\text{Conflict Index; } CI = \frac{\Delta K_e}{\exp(PET)}$$

$$\Delta K_e = \left(\frac{1}{2} m_1 u_1^2 - \frac{1}{2} m_2 u_2^2\right) - \frac{1}{2} (m_1 + m_2) v^2$$

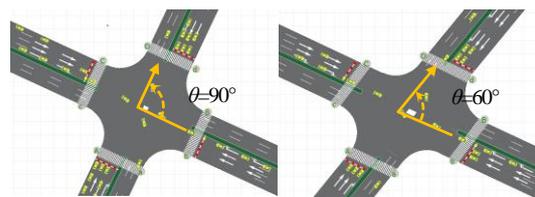


図9 ケーススタディ(シミュレータ画面)

⑦ 研究成果の発表状況

- 1) Chen, P., Nakamura, H., Asano, M. and Zeng, W.: A Microscopic Traffic Simulation Model for Safety Assessment of Left-turning Vehicle versus Pedestrian Conflict at Signalized Intersections, Proceedings of Infrastructure Planning, No.47, 8 pages, 2013.6.
- 2) 張 馨・中村英樹・浅野美帆・陳 鵬: 横断歩道長と歩行者青経過時間を考慮した横断歩行速度のモデル化, 土木計画学研究・講演集No.47, 7ページ, 2013.6.
- 3) 伊藤大貴・鈴木弘司: 歩行者と左折車の危険交錯事象と交差点構造の関連性分析, 土木計画学研究・講演集No.47, 6ページ, 2013.6.
- 4) Alhajyaseen W.K.M., Asano, M., Nakamura, H. and Dang, M.T.: Stochastic approach for modeling the effects of intersection geometry on turning vehicle paths, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol.32, pp.179-192, 2013.6.
- 5) Alhajyaseen, W., Asano, M. and Nakamura, H.: The Utilization of Kinetic Energy for the Safety Assessment of Intersections, 13th World Conference on Transport Research, 13 pages, Rio de Janeiro, 2013.7.
- 6) Asano, M., Alhajyaseen W., Nakamura, H. and Zhang, X.: A Stochastic Approach for Modeling Pedestrian Crossing Behavior after the Onset of Pedestrian Flashing Green Signal Indication, Proceedings of the 13th World Conference on Transport Research, 18 pages, Rio de Janeiro, 2013.7.
- 7) Zeng, W., Chen, P., Nakamura, H. and Asano, M.: Modeling Pedestrian Trajectory for Safety Assessment at Signalized Crosswalks, Proceedings of the 10th International Conference of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 17 pages, Taipei, Taiwan, 2013.9.
- 8) Zhang, X., Chen, P., Nakamura, H. and Asano, M.: Modeling Pedestrian Walking Speed at Signalized Crosswalks Considering Crosswalk Length and Signal Timing, Proceedings of the 10th International Conference of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 15 pages, Taipei, Taiwan, 2013.9.
- 9) Chen, P., Nakamura, H. and Asano, M.: Application of Surrogate Safety Measures for Assessment of Pedestrian Versus Left-turning Vehicle Conflict at Signalized Crosswalks, Proceedings of the International Conference Road Safety and Simulation 2013, 16 pages, Rome, Italy, 2013.10.
- 10) 渡部数樹・中村英樹・浅野美帆: 右折車両挙動分析とミクロシミュレーションによる安全性評価に関する考察, 土木計画学研究・講演集No.48, 8ページ, 2013.11.
- 11) 羽賀研太郎・浜岡秀勝: 交差点での横断歩道横断時における歩行者の右左折車確認行動に関する研究, 土木学会論文集D3 (土木計画学), Vol.69 No.5, 2013.12.
- 12) Zeng, W., Nakamura, H. and Chen, P.: A Modified Social Force Model for Pedestrian Behavior Simulation at Signalized Crosswalks, the 9th International Conference on Traffic and Transportation, 2014[forthcoming].
- 13) Zeng, W., Chen, P., Nakamura, H. and Asano, M.: Application of Social Force Model to Pedestrian Behavior Analysis at Signalized Crosswalk, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, [forthcoming].

⑧研究成果の活用方策

1)実務への適用に向けた活用方法・手段・今後の展開

- ・昨今では、研究プロジェクトや道路/交通管理者からの事故対策要望等の場面において、信号交差点での挙動を詳細に分析した改良提案の要望が高まっており、本研究の開発成果であるシミュレータはそれらのニーズに対し十分なアウトプットを算出できるツールとなり得る。
- ・開発したシミュレータを実務に適用することで、改良要望を収集してより活用しやすいシミュレータに改良していくとともに、シミュレータによる改良計画案と対策施工後の効果に関する比較分析を行い、適用性を確認していく必要がある。
- ・現在のシミュレーションは基本形である4枝の信号交差点のみであるが、その他の交差点方式(3枝交差点、無信号交差点、ラウンドアバウト 等)などへも拡充を図り、実務上汎用性の高いシミュレーションへと改良していく必要がある。

2)研究期間終了後における研究の継続性や成果活用の展開

- ・期間終了後も、異なる環境下における観測データを継続的に取得し、さらなるモデルの改良、追加を継続検討していく。
- ・本研究で主体としている挙動は自動車と歩行者のみであるが、二輪自動車や軽車両(自転車)についても展開していく必要がある。特に交差点部における自転車事故対策のニーズは昨今高まっていることから、対応を図る必要がある。

⑨特記事項

1)本研究から得られた知見、学内外へのインパクト等

- ・本年度研究では、主として右折専用現示における車両挙動と横断歩行者挙動について分析とモデル化を行い、昨年度の研究成果と合わせて、信号交差点でのほとんどの主要な挙動に関する分析結果が得られた。
- ・研究成果は国内(土木計画学研究発表会)や国外の研究発表会(TRB, WCTR, TRB-RSS, EASTS)において逐次公表し、高い注目を集めてきた。今後も研究成果を積極的に公表するとともに、国際展開を図っていく予定である。

2)研究の目的・目標からみた、研究の見通しや進捗の達成度についての自己評価

- ・研究の進捗はほぼ当初予定通りであり、順調に進んでいる。