

# ラウンドアバウト幾何構造設計の 安全性評価指標に関する検討

吉岡 慶祐<sup>1</sup>・中村 英樹<sup>2</sup>・下川 澄雄<sup>3</sup>・森田 綽之<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 日本大学理工学部 交通システム工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

E-mail: yoshioka.keisuke@nihon-u.ac.jp

<sup>2</sup>フェロー会員 名古屋大学大学院環境学研究科 都市環境学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: nakamura@genv.nagoya-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 日本大学理工学部 交通システム工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

E-mail: shimokawa.sumio@nihon-u.ac.jp

<sup>4</sup>フェロー会員 日本大学理工学部 交通システム工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

E-mail: hi-morita@i-transportlab.jp

平成28年4月に出版されたラウンドアバウトマニュアルでは、ラウンドアバウトの設計における基本的な考え方や手順、基本構造の諸元を示しており、我が国におけるラウンドアバウト設計の拠り所として活用されている。

ラウンドアバウトの設計は様々な構造要素の組合せであり、トライアンドエラーの繰返しによって進められる。従って、その設計プロセスにおいて幾何構造の評価が必要不可欠となる。しかしラウンドアバウトマニュアルには、このような評価を行うための定量的な指標は示されていない。

本研究では、海外の技術指針や既往研究で示されている速度推定モデルについて、国内のラウンドアバウトにおける調査結果からその適用性について検証するとともに、それぞれの特徴について整理し、我が国における評価方法の確立に向けた検討方針を提示した。

**Key Words:** Roundabout, Driving behavior, Safety Performance Index, Geometric design

## 1. はじめに

ラウンドアバウトは、平成26年9月の改正道路交通法の施行以降、信号交差点・無信号交差点に代わる交差点形式の新たな選択肢の一つとして、全国各地で検討が進められている。平成28年4月には、ラウンドアバウトの計画・設計に関する技術的指針である「ラウンドアバウトマニュアル<sup>1)</sup>」が発刊され、ラウンドアバウトの普及はさらに加速するものと思われる。

ラウンドアバウトの幾何構造設計は、上述のラウンドアバウトマニュアルにも記述があるように、様々な構造要素の組合せを決定するプロセスであり、トライアンドエラーの繰返しによって進められる。従って、その設計プロセスにおいて良し悪しを判断するための評価基準が必要不可欠となる。しかし我が国では、幾何構造の照査を行うための具体的な方法や評価指標は検討されておらず、先に述べたラウンドアバウトマニュアルでは定性的

な確認を行うにとどまっている。

そこで本研究では、海外ガイドラインにおける幾何構造設計の安全性評価に関する考え方についてレビューするとともに、安全性評価の中で用いられる速度の推定モデルについて、我が国で得られた調査結果を基に検証する。また、この結果から評価指標の考え方について考察し、幾何構造設計の照査方法の検討に向けた一つの知見とすることを目的とする。

## 2. 関連文献および既往研究の整理

### (1) ラウンドアバウトマニュアル

平成28年4月に出版された「ラウンドアバウトマニュアル」は、ラウンドアバウトの設計における基本的な考え方や手順、基本構造の諸元を示しており、我が国におけるラウンドアバウトの計画・設計の拠り所として活用

されている。

ラウンドアバウトマニュアルは、海外の設計指針の考え方を参考にしつつ、国内の設計事例や調査結果も踏まえたものとなっている。この中で、幾何構造設計の照査方法に関しては、国内での安全性に関する研究成果が十分ではないことから、現状では簡易なチェックを行う方法が例示されているのみである。しかしこれらのチェック項目はいずれも定性的な判断基準に基づくものであり、定量的な指標に基づいた評価方法の確立が求められている。

(2) アメリカのガイドラインにみる速度推定モデル

アメリカのラウンドアバウト設計ガイドラインである「Roundabouts: An Informational Guide 2<sup>nd</sup> Edition」<sup>2)</sup>では、幾何構造設計を照査する方法として、概略の設計段階で図-1に示す「Fastest Path」と呼ばれる走行軌跡を描き、その軌跡の曲線半径に基づいた予測速度を推定し、設計にフィードバックする方法が示されている。その際、走行軌跡はすべての進行方向に対して描かれ、流入部・環道部・流出部の軌跡の曲線半径を図面上から読み取り、式(1)により走行速度が推定される。

$$V_i = \begin{cases} 8.7602 \cdot R_i^{0.3861} & \text{for } e = +0.02 \\ 8.6164 \cdot R_i^{0.3673} & \text{for } e = -0.02 \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 $V_i$ : 予測速度[km/h],  $R_i$ : Fastest Pathの曲線半径[m],  $e$ : 片勾配[%]であり、 $i$ は流入部( $i=1$ ), 環道部( $i=2$ ), 流出部( $i=3$ )のいずれかのFastest Pathであることを示す。

式(1)は、走行する際の車両のつり合い条件から得られる速度と曲線半径の関係式をベースにしたものであるが、アメリカ国内の調査結果において、観測された速度の85パーセンタイル値によく整合することが報告されている。以上を踏まえ、ガイドラインの中ではさらに実務において利用しやすいよう、式(1)のように簡単な帰帰式として提示している。

なお、流入部・流出部における予測速度については、実際には環道部の速度がクリティカルとなる場合もあるため、環道部の予測速度から加減速度を考慮した式(2)(3)が用いられる。

$$V_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} V_{1phase} \\ 3.6 \sqrt{\left(\frac{V_2}{3.6}\right)^2 - 2a_{12}d_{12}} \end{array} \right. \quad (2)$$

$$V_3 = \min \left\{ \begin{array}{l} V_{3phase} \\ 3.6 \sqrt{\left(\frac{V_2}{3.6}\right)^2 + 2a_{23}d_{23}} \end{array} \right. \quad (3)$$

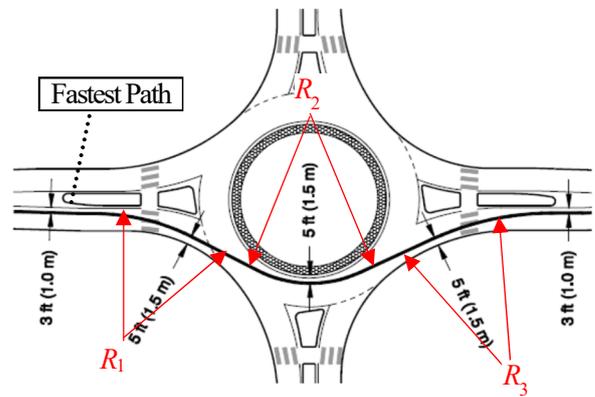


図-1 Fastest Path の描画例

出典: NCHRP Report 672 Roundabouts: An Informational Guide Second Edition を基に一部追記

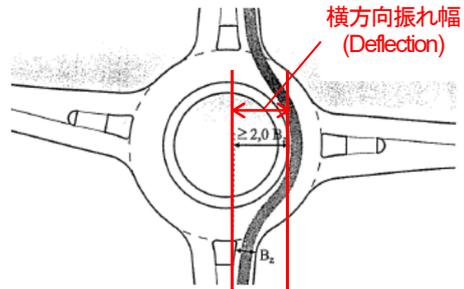


図-2 横方向振れ幅の定義

出典: Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehren, 2006 を基に一部追記

ここに、 $V_{i\text{phase}}$ : Fastest Pathから算出される速度[km/h],  $a_{12}$ : 流入部と環道内のFastest Path間の加速度[ $=1.3\text{m/sec}^2$ ],  $d_{12}$ : 流入部と環道内のFastest Path間の距離[m],  $a_{23}$ : 環道内と流出部のFastest Path間の加速度[ $=2.1\text{m/sec}^2$ ],  $d_{23}$ : 環道内と流出部のFastest Path間の距離[m]である。

算出された予測速度( $V_1, V_2, V_3$ )に基づき、流入部ごとの速度差や地域特性、接続道路のネットワーク特性等を勘案したうえで適切な速度であるか照査し、必要に応じて幾何構造設計にフィードバックすることとしている。予測速度はその判断材料の一つとして活用される。

(3) ドイツにおける幾何構造のチェック方法

ドイツの設計ガイドライン<sup>3)</sup>では、図-2のように、流入部の左端(左側通行の場合は右端)位置とエプロンの位置関係から算出される「Deflection(横方向振れ幅)」を代理指標とした幾何構造のチェック方法を示している。

これは、横方向振れ幅の量によって直進車両の走行軌跡が変化し、その結果走行速度にも影響するとの知見によるものである。しかし、速度や安全性などの定量的な関係性までは明らかになっておらず、幾何構造設計を進める上での一つの簡便なチェック項目として設けているものである。

表-1 調査対象箇所と幾何構造諸元

	山の手		沼目		安曇野		野辺							
枝数	4		4		4		5							
外径	27m		27m		32m		31m							
環道幅員	5.0m		5.0m		5.0m		5.0m							
エプロン幅員	2.0m		2.0m		3.5m		2.5m							
流入部名称	W	E	N	S	NW	E	N	SE	S	SW	NW			
進行方向	W→E	E→W	N→S	S→N	NW→E	E→NW	N→SE	N→SW	SE→SW	S→N	SW→N	SW→SE	NW→SW	
流入部間交差角度	180°	180°	180°	180°	173°	187°	177°	223°	130°	183°	137°	230°	168°	
流入部接続角度	46°	46°	56°	52°	60°	54°	52°		52°	63°	62°		52°	
流入部幅員	3.6m	3.5m	4.1m	3.0m	4.0m	3.2m	3.0m		2.8m	3.0m	2.8m		2.8m	
流入隅角部曲線半径	25m	25m	13m	9m	5m	8m	9m		9m	6m	6m		10m	
Fastest Path 曲線半径	R1	60m	60m	35m	38m	22m	27m	25m	22m	17m	17m	15m	18m	22m
	R2	13m	15m	11m	11m	15m	13m	15m	13m	28m	14m	40m	12m	17m
	R3	48m	40m	68m	66m	24m	27m	33m	15m	13m	19m	40m	28m	26m
サンプル数	32	23	13	11	10	12	12	15	21	13	24	26	8	



図-3 調査対象箇所の UAV 撮影イメージ

※写真中のアルファベットは流入部名称を示す

(4) その他の関連研究

その他の幾何構造設計の評価方法に関する海外の研究例として、速度と幾何構造の関係について調査した研究がいくつか存在する。

Bassaniら<sup>4)</sup>は、イタリア国内の7地点のラウンドアバウト(ミニラウンドアバウトと2車線ラウンドアバウトを含む)において、環道内の速度の85パーセンタイル値と幾何構造の関係について重回帰分析を行い、式(4)に示す結果を得ている。

$$V_{2,85th} = 0.4433 \cdot D + 0.8367 \cdot W_{cir} + 3.2272 \cdot W_{ent} \quad (4)$$

ここで、 $V_{2,85th}$ : 85パーセンタイル速度[km/h]、 $D$ : 外径[m]、 $W_{cir}$ : 環道幅員[m]、 $W_{ent}$ : 流入部幅員[m]である。

Basharら<sup>5)</sup>は、Bassaniと同様に、ヨルダン国内の30箇所のラウンドアバウトにおいて、環道内の速度の85パーセンタイル値と幾何構造の関係について重回帰分析を行い、式(5)に示す結果を得ている。

$$V_{2,85th} = 14.321 + 0.196 \cdot V_{app} + 0.655 \cdot W_{ent} + 0.11 \cdot D + 0.048 \cdot DC - 11.96 \cdot \theta_{ent} \quad (5)$$

ここで、 $V_{app}$ : 流入部アプローチの自由走行速度[km/h]、 $DC$ : ドライブカーブ[m]、 $W_{ent}$ : 流入部幅員[m]、 $\theta_{ent}$ : 流入角度[rad]である。ドライブカーブとは、流入部と流出部間の距離、および環道を走行する際の横方向の振れ幅から算出されるパラメータである。

3. 車両挙動データの取得

(1) 調査対象箇所

海外の速度推定モデルを検証するにあたり、国内で供用後一定期間経過した、幾何構造の特徴が異なる4か所のラウンドアバウトを対象とし、走行軌跡や速度等の車両挙動データを取得した。表-1は対象のラウンドアバウトにおける、進行方向別の主な幾何構造要素等の諸元を比較したものである。

(2) UAVによる走行挙動データの取得

流入から流出までの走行軌跡や速度などの連続的な挙動変化を取得するため、UAV(Unmanned Aerial Vehicle: 無人航空機)による撮影調査を実施した。図-3は、UAVによる撮影画角のイメージである。

UAVにより上空から撮影した映像データからの、各種車両挙動データの取得手順は、以下のとおりである。

まず、撮影した映像データのレンズの歪みや映像のブレを取り除き、補正後の映像データから、車両の前面中央位置(ナンバープレート位置)を0.2秒ごとに手作業によりプロットし、ビデオ画面上の車両位置を取得する。次に、ビデオ画面上のローカル座標系の車両位置データを、ラウンドアバウトの中心を原点とした平面直角座標系に

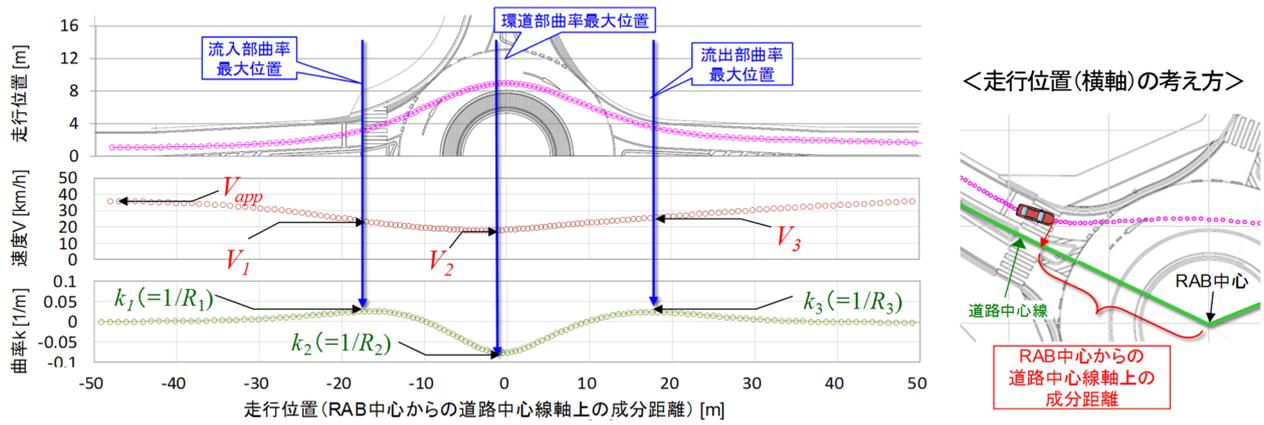


図-4 各種挙動データのプロフィールとパラメータの定義

射影変換する。この際、カルマンフィルターによる平滑化処理を行うとともに、0.1秒ごとの挙動データに補間処理を行った。さらに、0.1秒単位の離散的な位置データから、速度・曲率等の走行挙動データを算出した。曲率は、車両の進行方向を表す任意の方向角の走行距離に対する変化量であり、ステアリングの操舵角を示す物理量として定義する。なお、曲率の逆数は軌跡の曲線半径に相当する。

なお本研究では、幾何構造そのものが走行挙動に与える影響を把握することを目的としているため、乗用車の自由走行車両のみを対象とし、大型車のほか、追従車両や他の車両や歩行者等により挙動に影響を受けたと思われる車両は分析対象としていない。

(3) 挙動パラメータの定義

図-4は、取得した速度・曲率の車両挙動データについて、代表的な1台のプロファイルを示したものである。ここで横軸の走行位置は、ラウンドアバウト中心からの距離を、道路中心線軸上の成分の距離に換算したものである。これを基に、アメリカの速度予測の考え方を踏まえ、図-4のように観測した車両ごとに流入部における曲率の最大地点の速度を $V_1$ 、またその際の曲率を $k_1$ 、曲線半径を $R_1$ とし、環道部・流出部の曲率(絶対値)の最大地点についても、同様に $V_2$ 、 $k_2$ 、 $R_2$ 、 $V_3$ 、 $k_3$ 、 $R_3$ を取得した。

(4) 進行方向別の速度の比較

図-5は、進行方向ごとに速度 $V_1$ の最大値、85パーセンタイル値、平均値、15パーセンタイル値、最小値を比較したものである。平均値で比較すると、全体的に20km/h前後であり、それほど大きな違いが見られない。一方85パーセンタイル値を比較すると、20km/hから30km/h程度まで進行方向によって差が見られる。単に平均速度のみの比較では、一部の高速で走行する車両の影響が薄まるため、安全性に対して適切な判断ができない可能性がある

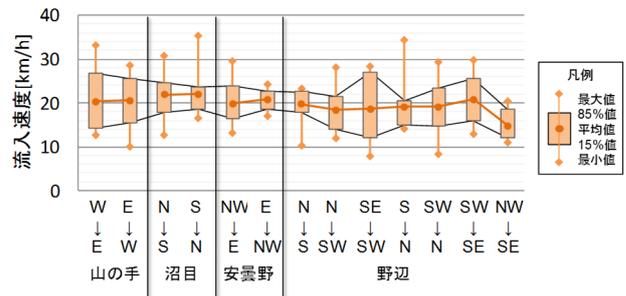


図-5 速度  $V_1$  の比較結果

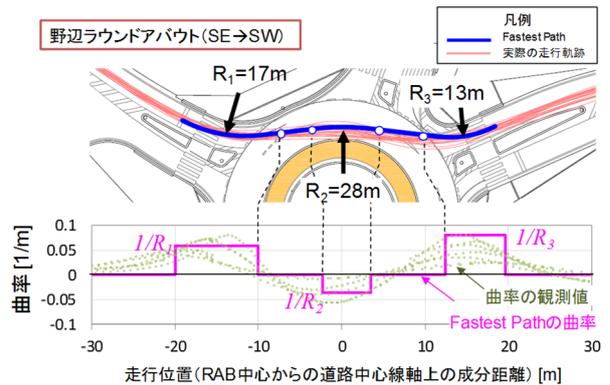


図-6 Fastest Path と実際の走行軌跡の比較(山の手)

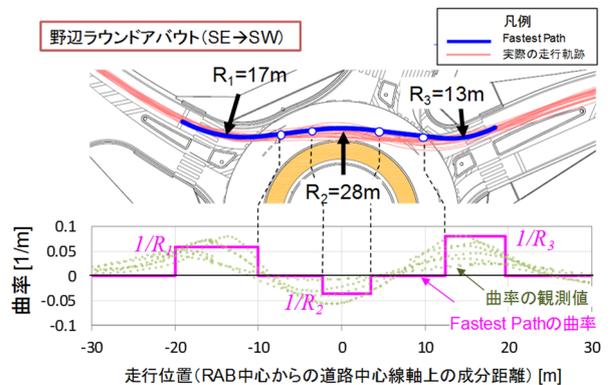


図-7 Fastest Path と実際の走行軌跡の比較(野辺)

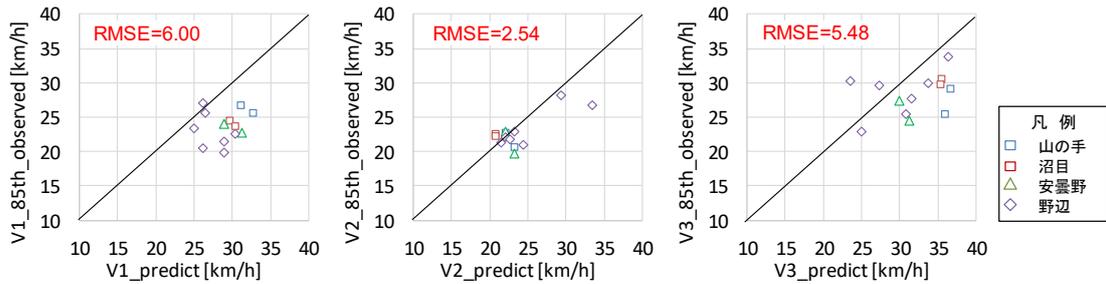


図-8 アメリカの Fastest Path による  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  の予測速度と観測結果の比較

る。従って、標準偏差など車両間の挙動のばらつきの程度を示すパラメータやパーセンタイル値等も評価のうえで考えるべき要素である。

#### 4. 既往研究の速度予測モデルの検証

##### (1) Fastest Path と実際の走行軌跡の比較

図-6.7は、山の手および野辺ラウンドアバウトで取得した走行軌跡と、2章で述べたアメリカの速度推定方法に用いる「Fastest Path」を、アメリカと同様の手順でCADを用いて作図した例を示したものである。作図においては、Wisconsin州のラウンドアバウト設計ガイド<sup>6)</sup>にCADを用いた作図手順が紹介されており、この手順に基づくこととした。

作図によって描かれたFastest Pathは、図面上で見ると実際の観測結果に近い軌跡が描かれていることが見て取れる。しかし、Fastest Pathは円弧と直線の組合せで描かれるものの、実際の軌跡は緩和曲線(クロソイド曲線)を含んだものとなっている。従って、図-6.7のように曲率の変化で比較すると、Fastest Pathは曲率の変化まで忠実に再現したものではなく、最大となる曲率の発生位置やその大きさなど、軌跡の全体的な傾向が把握できる程度となっていることが確認された。

##### (2) 速度予測モデルの検証

図-8は、観測された速度 $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ の85パーセンタイル値とFastest Pathに基づき、式(2)(3)を用いて算出した予測速度を比較したものである。環道部の $V_2$ 速度については、RMSE(平均2乗誤差)が2.54km/hであり、最大でも5km/h程度の誤差となっていることから、比較的精度の良い推定結果であると考えられる。一方流入部・流出部の $V_1, V_3$ については、RMSEがいずれも5km/h以上となっており、環道部の $V_2$ と比較して精度は低い。また $V_1, V_3$ は、全体的に予測速度の方が高く過大推計にある傾向にある。これは、我が国のラウンドアバウトでは、流出入口に速度抑止のための安全対策が実施されることが多いため、予測速度と比較して安全側の走行速度となっているもの

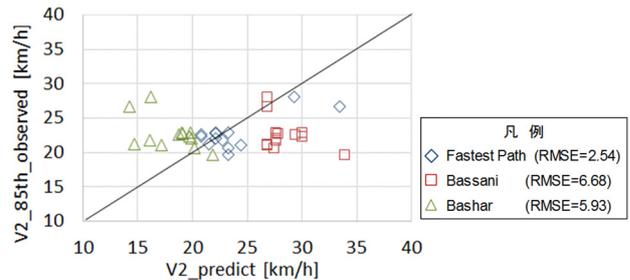


図-9  $V_2$  の予測速度と観測結果の比較

と考えられる。

また、図-9は環道部の速度 $V_2$ について、BassaniおよびBasharの既往研究で示される推定モデル(式(4)(5))も加えて、観測結果の85パーセンタイル値と比較したものである。その結果、実際の観測結果と比較して、Bassaniのモデルは過大に、Basharのモデルは過少に推定されており、いずれもFastest Pathを用いた推定方法と比較して誤差が大きい。これは、BassaniやBasharのような回帰モデルは、多車線ラウンドアバウトや外径が非常に大きいものまで、様々な構造条件の調査結果を含んだ推定したモデルとなっており、我が国の特定の幾何構造条件の中では精度が得られなかったものと考えられる。

##### (3) 安全性の評価指標に関する検討

表-2は、予測速度の推定方法の検証結果を踏まえ幾何構造の評価においての方針について整理したものである。

回帰モデルなどにより速度を推定する方法は、(2)の検証結果を踏まえると、海外のモデル式をそのまま我が国に適用することは不可能である。我が国の調査結果を蓄積し、モデル式を検討することも考えられるが、ラウンドアバウトは非常に多くの幾何構造要素を持つため、今後の十分な調査結果が必要である。

一方アメリカのFastest Pathのように、図面上から走行軌跡を推定する方法は、様々な幾何構造要素やその組合せの影響を包含しており、あらゆる構造条件にも対応できる有用な指標であると考えられる。実際に我が国のラウンドアバウトに適用した場合においても、速度の予測精度は高いものであった。一方、Fastest Pathの作図は複雑で時間を要するため作業上の負荷が大きいといった側

表-2 幾何構造の評価方法の比較

	回帰モデルによる評価	軌跡ベースによる評価	代理指標による評価
評価の基本的考え方	<ul style="list-style-type: none"> <li>幾何構造要素と速度の関係式を調査結果から推定(重回帰モデル等)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>図面上から走行軌跡を描画し、軌跡に応じた速度を推定(アメリカの Fastest Path 等)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>図面上から幾何構造の組合せに応じて得られる何らかの寸法等を代理指標として使用(Deflection 等)</li> </ul>
長所	<ul style="list-style-type: none"> <li>幾何構造の諸元値から、直接速度を推定可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>速度の予測精度が高い</li> <li>様々な幾何構造要素の影響とその組み合わせ方を包含した指標</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>図面上から簡易に確認が可能</li> </ul>
短所	<ul style="list-style-type: none"> <li>モデル推定のために、幾何構造のバラエティを持った調査サンプルが必要</li> <li>幾何構造条件によっては、予測精度が低い可能性がある</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>軌跡の描画が複雑で手間がかかる</li> <li>CAD などの作図ソフトが必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>全ての幾何構造要素を含んだものとはならない</li> <li>速度や安全性との関係について知見が不十分</li> </ul>

面もある。

これに対し、ドイツのDeflection(横方向振れ幅)のような代理指標によるチェックは、図面上で簡易に確認が可能であるが、速度や安全性との関係については知見が不十分である。また、全ての幾何構造要素の影響を加味することは難しく、例えばDeflectionの場合、流入部間の交差角度の影響は考慮できない点に注意が必要である。

以上を踏まえると、幾何構造の評価の方向性として、アメリカのように実際に想定される走行軌跡をベースに検証することが望ましいが、標準的な正十字のラウンドアバウトにおいては、今後の検証を踏まえたうえで、代理指標による簡易なチェック方法とすることも一つの選択肢であると考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、海外の技術指針や既往研究で示されている速度推定モデルについて、国内のラウンドアバウトにおける調査結果を用いて検証した。その結果、アメリカのFastest Pathによる予測速度は、他の既往研究で示される回帰モデルと比較して予測精度が高いことが示された。一方、Fastest Pathの作図は非常に複雑で手間のかかる作業であるため、標準的な幾何構造の場合は代理指標を用いた簡略的なチェック方法とするなど、状況に応じた評価のあり方について示唆した。

一方、いずれの評価方法においても、我が国のラウンドアバウトにおける車両挙動に関するデータは不十分である。今後は、引き続きデータの蓄積を行うとともに、

幾何構造設計において活用可能な評価方法及び評価指標について検討する方針である。

## 謝辞

本研究は、JSPS科研費基盤研究(B)16H04426の助成を受けたものです。

また、本研究を進めるにあたり、調査の実施・データの整理において(株)国際航業の阿部氏・村木氏・大島氏・高木氏に多大な協力を賜りました。ここに感謝の意を示します。

## 参考文献

- 1) (一社)交通工学研究会：ラウンドアバウトマニュアル, 2016.
- 2) National Cooperative Highway Research Program (NCHRP): NCHRP Report 672 Roundabouts: An Informational Guide Second Edition, 2010.
- 3) Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen (FGSV): Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehren, 2006.
- 4) Bassani, M., Sacchi, E.: Experimental investigation into speed performance and consistency of urban roundabouts: an Italian case study, 3rd International Conference on Roundabouts, Transportation Research Board, 2011.
- 5) Bashar, H. Al-Omari, Khalid A. Ghuzlan, and Lina B. Al-Helo: Modeling Through Traffic Speed at Roundabouts Along Urban and Suburban Street Arterials, The Journal of the Transportation Research Forum (JTRF), Volume 53 No. 2, 2014.
- 6) Wisconsin Department of Transportation: Roundabout Guide, 2016

## An Investigation on the Safety Evaluation Index for Roundabout Design

Keisuke YOSHIOKA, Hideki NAKAMURA, Sumio SHIMOKAWA  
and Hirohisa MORITA