

## ラウンドアバウトの幾何構造が走行挙動特性に与える影響に関する分析 An Analysis on Impact of Roundabout Geometric Elements on Driving Behavior

吉岡 慶祐<sup>1</sup>, 中村 英樹<sup>2</sup>, 下川 澄雄<sup>3</sup>, 森田 緯之<sup>4</sup>

Keisuke YOSHIOKA<sup>1</sup>, Hideki NAKAMURA<sup>2</sup>, Sumio SHIMOKAWA<sup>3</sup> and Hirohisa MORITA<sup>4</sup>

ラウンドアバウトでは、通常の十字交差点と異なり S 字の走行軌跡が生じるため、安全性・円滑性の観点から適切な走行挙動が実現するような幾何構造設計が重要である。しかし我が国では、このようなラウンドアバウト特有の走行挙動特性や、幾何構造との関係性について明らかになっていない。そこで本研究では、異なる幾何構造を有する 4 箇所のラウンドアバウトにおいて、UAV による走行挙動調査を実施し、幾何構造が走行挙動特性に与える影響について分析した。その結果、流入部の隅角部曲線半径と流入部間の交差角度が、車両の走行性に対して重要な要素であることを明らかにした。さらに、車両間の走行挙動のばらつきを抑えるためには、流入隅角部の曲線半径を過剰に大きくしないことや、流入部間の交差角度が小さい場合には外径を大きくするなどの構造の工夫が有効であることを示した。

**Keywords:** ラウンドアバウト, 走行挙動, 幾何構造設計

### 1. はじめに

ラウンドアバウトは平面交差点の制御方式の一つとして、平成 26 年 9 月の改正道路交通法の施行を契機に全国各地で導入が検討されている。また、平成 28 年 4 月には、ラウンドアバウトの計画・設計に関する拠り所となる「ラウンドアバウトマニュアル」<sup>1)</sup>が発表され、ラウンドアバウトの普及は全国的なものへとその広がりを見せている。

ラウンドアバウトでは信号機による交通制御を行わないため、安全性や円滑性の確保のためには、適切な走行挙動が実現するような幾何構造設計が必要である。特に直進で通過する際は、中央島が設置されることにより、流入から流出までの S 字走行において複数回のステアリング操作が生じるため、通常の交差点と比較して複雑な走行挙動となる。従って、幾何構造の設計においては、このような挙動特性を十分に把握しておくことが重要である。一方、このようなラウンドアバウト特有の走行挙動に関して、その詳細な挙動特性や幾何構造との関係については十分に明らかとなっていない。

そこで本研究では、異なる幾何構造を有する複数のラウンドアバウトにおいて、直進で通過する乗用車を対象に流入から流出までの走行挙動特性について把握すると

ともに、幾何構造との関係について明らかにし、安全で円滑な走行を実現する幾何構造設計に際しての知見の一つとすることを目的とする。

### 2. ラウンドアバウト幾何構造設計に関する知見の整理

#### 2.1 ラウンドアバウトマニュアル

平成28年4月に発表されたラウンドアバウトマニュアル<sup>1)</sup>では、我が国におけるラウンドアバウトの計画・設計の基本的な考え方や各構成要素の標準的な諸元等を示している。これらは、海外の設計指針を参考にしつつ、国内における調査・研究を踏まえて作成されたものであるが、一部の内容については、必ずしも我が国における十分な調査・研究結果を根拠としたものではない。特に流入部の形状については、速度を抑制するような構造とすることを強調しているが、これを実現するための具体的な構造要件までは言及していない。

また、幾何構造設計の手順の中で安全性や円滑性に関する照査方法を提示しているが、各幾何構造要素に対して定性的な確認項目を設けているのみである。従って、安全性や円滑性に対して定量的な評価をすることが不可能であり、設計者の主観により設計の良し悪しの判断が異なることも考えられる。

- 
- 1 正会員, 修士(工学), 日本大学理工学部交通システム工学科  
Member, ME, Department of Transportation System Engineering, College of Science and Technology, Nihon University  
〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 e-mail: yoshioka.keisuke@nihon-u.ac.jp Phone: 047-469-5503
  - 2 正会員, 工学博士, 名古屋大学大学院環境学研究科  
Member, Dr. Eng., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University
  - 3,4 正会員, 博士(工学), 日本大学理工学部交通システム工学科  
Member, Dr. Eng., Department of Transportation System Engineering, College of Science and Technology, Nihon University

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		
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
流入部間交差角度	180°	180°	180°	180°	173°	187°	177°	223°	130°	183°	137°	230°
流入部接続角度	46°	46°	56°	52°	60°	54°	52°		52°	63°	62°	
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	
流入隅角部曲線半径	25m	25m	13m	9m	5m	8m	9m		9m	6m	6m	
サンプル数	32	23	13	11	10	12	12	15	21	13	24	26



図 1 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

## 2.2 ラウンドアバウトの走行挙動に関する既往研究

近年のラウンドアバウトの普及を受けて、これまでに導入された箇所で行われた調査から、走行挙動に関する知見は少しずつ増加している。

例えば(公財)国際交通安全学会の調査<sup>2)</sup>では、飯田市東和町、焼津市関方(山の手)におけるラウンドアバウト導入前後の比較から、ラウンドアバウト導入後は交差点内での走行速度が大きく低下したことを示している。

また筆者ら<sup>3)</sup>は、守山市立田町のラウンドアバウトにおける走行挙動調査から、走行軌跡や走行速度に関する基礎分析を行っている。その結果、環道内を直線的に走行する車両は速度が高い傾向にあることを確認している。

以上のように、ラウンドアバウトの走行挙動特性に関する知見は蓄積されつつあるものの、これまでの既往研究は特定の箇所での調査結果に基づくものが中心である。これに対し本研究は、これまでの既往研究では把握できていない、走行挙動と幾何構造の関係について明らかにしようとするものである。

## 3. 走行挙動データの取得

### 3.1 調査箇所の概要

本研究では、異なる幾何構造を有する 4 箇所のラウンドアバウトを対象とし、走行挙動データを取得するための調査を実施した。各調査箇所の幾何構造条件は、表 1 に示すとおりである。外径や環道幅員はほとんど変わらないが、流入部間の交差角度や隅角部曲線半径等は、それぞれ異なる特徴を有している。

### 3.2 走行挙動データの整理

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、本研究では UAV(Unmanned Aerial Vehicle：無人航空機)による撮影調査を実施した。図 1 は、UAV による撮影画角のイメージである。上空から撮影した映像データを基に、以下の手順で各種走行挙動データを取得した。

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。これら一連の作業については、交通流解析ソフト「Traffic Analyzer」<sup>4)</sup>を用いて実施した。なお、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。また、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。

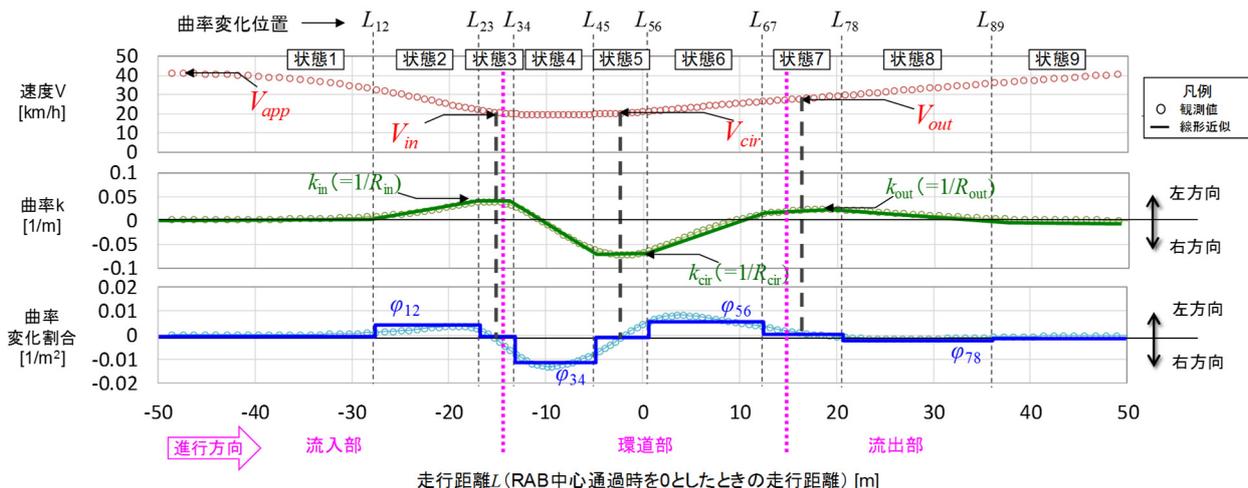


図2 各種走行挙動プロファイルの例と挙動パラメータの定義

#### 4. 直進車両の走行挙動特性

##### 4.1 流入～流出の走行プロファイル

図2は、山の手ラウンドアバウトのWからEの方向に直進で通過した代表的な1台の車両について、速度・曲率・曲率の変化量(曲率の1回微分)のプロファイルを描いたものである。

ステアリング操舵の程度を示す曲率の変化について着目すると、流入部・環道部・流出部において曲率のピークが3回発生していることが分かる。これはラウンドアバウト特有のS字走行において、ステアリングの連続的な操作が生じていることを示している。さらにステアリング操舵速度を示す曲率の変化割合を見ると、流入部から環道部にかけて短い区間の中で逆方向へのステアリング操作が発生していることが分かる。このようなステアリング操作は、ラウンドアバウトにおける走行挙動の大きな特徴の一つであるとともに、安全性や円滑性に大きく影響を及ぼすものと考えられる。

##### 4.2 曲率変化の線形近似による運転行動の把握

4.1で述べたステアリング操作についてさらに詳細な分析を行うため、曲率の変化を線形近似により定式化し、ステアリング操作の発生位置などの空間的な特性について把握する。図2の線形近似で示したラインは、各車両が走行距離に対して一定の速度でステアリング操作(クロソイド走行)を行うとの仮定に基づき、曲率の変化割合を一定とした線形要素の組合せとして考えたものである。ラウンドアバウトを直進で通過する際は、図2に示すよう、走行状態1から走行状態9のように9段階のステアリング操作が発生する。このとき、走行状態*i*における曲率*k<sub>i</sub>*はそれぞれ式(2)のように定式化できる。

$$k_i(L) = \begin{cases} 0 & L \leq L_{12} \\ \varphi_{12} * L - \varphi_{12} * L_{12} & L_{12} \leq L \leq L_{23} \\ k_{in} & L_{23} \leq L \leq L_{34} \\ \varphi_{34} * L + \frac{L_{34}k_{in} - L_{23}k_{cir}}{L_{34} - L_{23}} & L_{34} \leq L \leq L_{45} \\ k_{cir} & L_{45} \leq L \leq L_{56} \\ \varphi_{56} * L + \frac{L_{56}k_{cir} - L_{45}k_{out}}{L_{56} - L_{45}} & L_{56} \leq L \leq L_{67} \\ k_{out} & L_{67} \leq L \leq L_{78} \\ \varphi_{78} * L - \varphi_{78} * L_{78} & L_{78} \leq L \leq L_{89} \\ 0 & L_{89} \leq L \end{cases} \quad (2)$$

ここに、*k<sub>i</sub>*: 走行状態*i*における曲率、*L<sub>ij</sub>*: 走行状態*i*から*j*へ変化する位置、*k<sub>in</sub>*、*k<sub>cir</sub>*、*k<sub>out</sub>*は流入部、環道部、流出部に発生する曲率のピーク値である。

また、 $\varphi_{12}$ 、 $\varphi_{34}$ 、 $\varphi_{56}$ 、 $\varphi_{78}$ はステアリング操舵時の曲率の変化の割合であり、例えば走行状態4における $\varphi_{34}$ は、一定の曲率変化を仮定するため式(3)で表される。

$$\varphi_{34} = \frac{k_{cir} - k_{in}}{L_{45} - L_{34}} \quad (3)$$

式(2)により定式化した曲率と観測データから得られる曲率を比較し、ラウンドアバウトの前後50mずつの走行区間について、式(4)のように誤差の2乗和が最小となるような未知パラメータ  $\Phi^*$  を準ニュートン法により探索する。

$$\Phi^* = \operatorname{argmin} \left[ \sum_{L=-50}^{50} \left\{ k(L|\Phi^*) - \frac{d\theta}{dL}(L) \right\}^2 \right] \quad (4)$$

ここに、 $\Phi^*$ は式(5)に示すように、曲率の変化位置および曲率のピーク値に関する未知パラメータベクトルである。

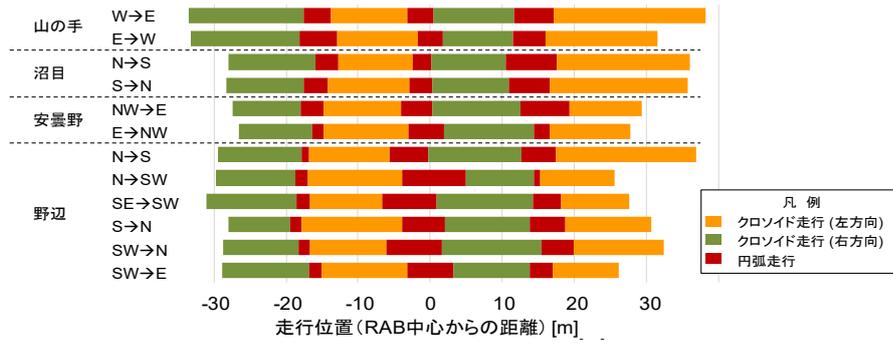


図3 進行方向別走行状態の変化

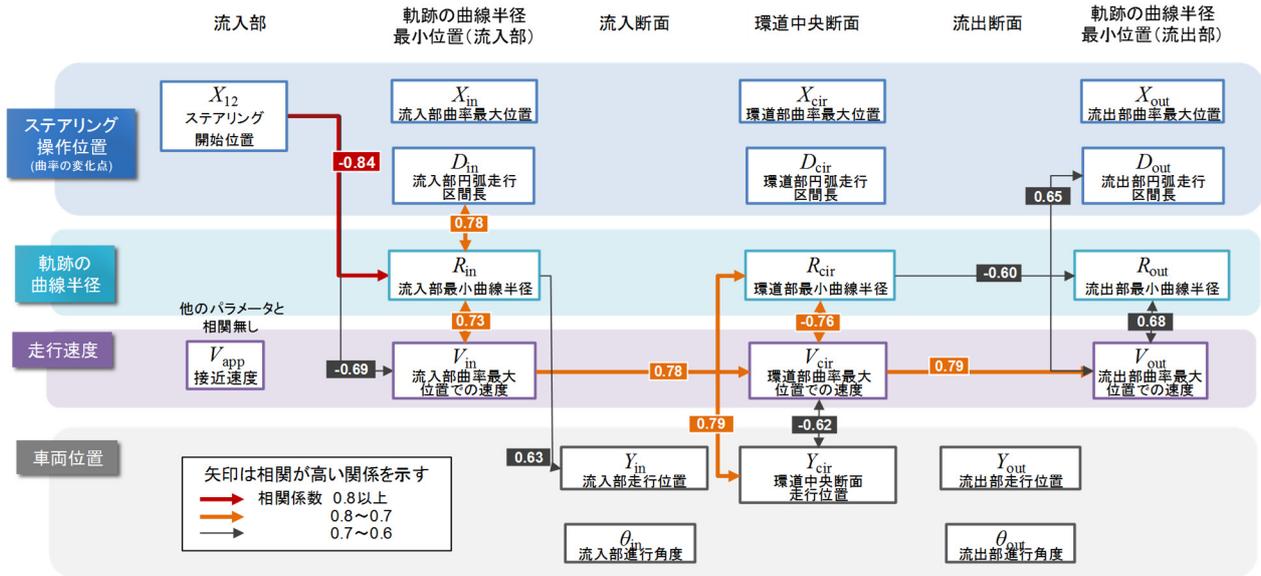


図4 各種挙動パラメータ間の相関

$$\Phi^* = \begin{pmatrix} L_{12} \\ L_{23} \\ \vdots \\ L_{89} \\ k_{in} \\ k_{cir} \\ k_{out} \end{pmatrix} \quad (5)$$

図3は、式(4)から推定された曲率の変化位置から推定される、走行状態の変化を進行方向別に示したものである。各走行状態の発生場所や区間長は、ラウンドアバウトの中心に対して対称とはならず、進行方向によってその特徴は異なっている。とくに、外径27mの正十字ラウンドアバウトである山の手や沼目では、円弧走行の区間が短く、環道を走行する際に素早いステアリング操作が生じていることが分かる。

### 4.3 流入から流出までの走行挙動プロセス

4.2で推定した全サンプル分の曲率の空間的な変化位置に関するパラメータを基に、流入から流出までの走行挙動のプロセスについて考察する。ラウンドアバウトを

通過する際、ドライバーはある時点での走行状況(速度・走行位置・進行方向等)に対して、その先の幾何構造特性に応じた合理的な速度やステアリング操作で走行するものと考えられる。図4は、流入から流出までの走行プロセスの中で、これらの走行状況を示す各種パラメータの関連性について分析し、パラメータ間の相関が高い(相関係数の絶対値が0.6以上)ものをパス図として示したものである。この中で、流入部・環道部・流出部の円弧走行区間の中心位置を最大曲率の発生位置とし、例えば流入部の最大曲率発生位置とその区間長は以下の式(8)(9)により算出する。

$$X_{in} = \frac{x_{23} + x_{34}}{2} \quad (8)$$

$$D_{in} = x_{23} - x_{34} \quad (9)$$

ここに、 $X_{in}$ : 流入部最大曲率発生位置、 $D_{in}$ : 流入部の円弧走行区間の長さ[m]である。

図4によると、まず流入部手前における最初のステアリング操作位置が流入時の曲線半径と負の強い相関があり、ステアリング位置が環道から遠い( $X_{12}$ の値が小さい)ほど、流入時の最小曲線半径が大きいく( $R_1$ の値が小さい)

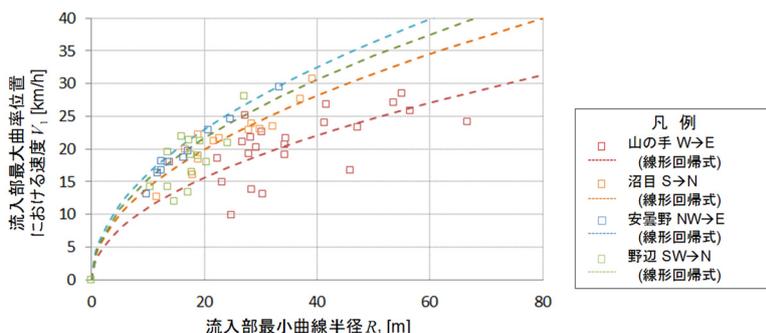


図5 進行方向別の曲線半径と速度の関係(流入部曲率最大位置)

表2 進行方向別のパラメータcの推定値および平均2乗誤差

進行方向		山の手		沼目		安曇野		野辺					
		W→E	E→W	N→S	S→N	NW→E	E→NW	N→S	N→SW	SE→SW	S→N	SW→N	SW→E
流入部	推定値	3.70	3.49	4.46	4.53	4.89	5.14	5.01	4.15	4.69	5.08	4.72	4.65
	RMSE	2.73	3.81	1.74	2.36	0.98	1.09	2.06	2.60	3.18	3.77	2.13	1.35
環道部	推定値	5.31	5.03	5.68	5.78	5.94	5.14	5.92	5.61	2.54	5.75	3.50	5.53
	RMSE	2.10	2.16	0.845	2.56	1.58	1.09	2.54	4.35	12.71	2.42	5.22	3.30
流出部	推定値	3.93	3.59	4.07	4.23	4.67	5.35	4.72	5.14	5.22	4.36	4.38	4.56
	RMSE	4.21	4.32	2.53	3.48	2.32	1.92	2.15	1.70	1.75	3.55	2.74	2.54
サンプル数		32	23	13	11	10	12	10	13	19	13	23	27

ことを示している。環道部では、軌跡の曲線半径や速度、走行位置の間にそれぞれ相関があり、走行上のクリティカルなポイントであると考えられる。また、流入部・環道部・流出部ともに、曲線半径と速度の間に一定の相関が見られており、ステアリング操作の程度が速度に影響していることが確認できる。

5. 曲線半径-速度の関係に基づく幾何構造の評価

5.1 軌跡の曲線半径-速度と走行性の関係

前章の挙動特性分析において、流入部・環道部・流出部の各段階における軌跡の曲線半径と速度に相関が見られたことを踏まえ、幾何構造がこれらの関係性に与える影響について分析する。

一般に車両が曲線部を走行する際は、ドライバーは安全かつ快適に走行できるよう、無意識のうちに、ある一定の力学的条件の範囲内で走行しているものと考えられる。式(10)は物体に加わる遠心力を求める式であるが、これを变形すると、速度Vは、遠心力に関わるパラメータcおよび曲線半径Rの1/2乗と比例関係にあることが分かる。

$$F = m \frac{V^2}{R} \tag{10}$$

$$\therefore V = \sqrt{\frac{FR}{m}} = c \times \sqrt{R} = c \times k^{-\frac{1}{2}} \tag{11}$$

ただし、 $c = \sqrt{\frac{F}{m}}$

ここに、R: 曲線半径[m], V: 速度[m/sec], F: 遠心力[N], m: 質量[kg], c: 定数, k: 曲率[1/m]である。

ラウンドアバウトの幾何構造設計を考える場合、S字走行の連続的なステアリング操作が生じる中で、単に速度の大小のみではなく、適切な速度と曲線半径の関係が実現されるような幾何構造設計であることが、安全な設計を行う上での前提条件であると考えられる。図5は、以上の考え方にに基づき、各車両の流入部曲率最大発生位置における速度V<sub>in</sub>と曲線半径R<sub>in</sub>の観測値をプロットし、さらにこれらの関係を示すパラメータcを最小2乗法により推定したものである。なお、その他の進行方向別の推定結果は表2に示すとおりである。この中で「山の手」については、他の箇所と比較して全体的にパラメータcの推定値が低い(曲線半径に対する速度が低い)一方、ばらつきを示す平均2乗誤差(RMSE)が大きい傾向にある。このような挙動特性の違いと幾何構造条件の関係について次節で分析する。

5.2 幾何構造が速度-曲線半径の関係に与える影響

表3は、パラメータcの推定値および平均2乗誤差(RMSE)と、表1に示した各種幾何構造要素との相関について整理したものである。この結果に基づき、幾何構造が走行挙動に与える影響と、そこから考察される設計上の留意事項等について、以下の2点が挙げられる。

(a) 流入部幾何構造

まず表3の流入部に着目すると、パラメータcの推定値に対して、流入隅角部の曲線半径と最も強い相関があることがわかる。図6はこの関係を詳しく見たものである。流入隅角部の曲線半径が小さいほどパラメータcの平均値は高い。これは、流入隅角部の曲線半径を一定程度とすることで走行性が確保されることを示している。一方、

車両間のばらつきについて、隅角部曲線半径が大きいほど平均2乗誤差が大きい。これは隅角部曲線半径を大きくすることで、緩いステアリング操作での流入が物理的に許容され、一部の車両が高速となるためである。従って、過剰に曲線半径を大きくすることは、安全上望ましいものではないと考えられる。

**(b) 流出入口交差角度**

次に表3の環道部に着目すると、パラメータcの推定値と流入部間の交差角度にも高い相関が見られ、図7はこの関係について詳しく見たものである。

ラウンドアバウトを直進方向へ通過する場合、環道内において中央島またはエプロン部を避けるためのステアリング操作が生じる。ここで、野辺のSE→SWやSW→Nのように流出入口間の交差角度が180°より小さい場合、環道部を斜め方向に進行するため進行方向に対してエプロンや中央島により生じる横方向振れ幅(Deflection)が減少する。その結果、パラメータcの推定値は下がるものの、走行の自由度が高くなるため平均2乗誤差は大きくなり、走行挙動にばらつきが生じやすくなるものと考えられる。このような場合は外径を大きくすることで、横方向振れ幅を確保することが重要であると考えられる。

**6. まとめ**

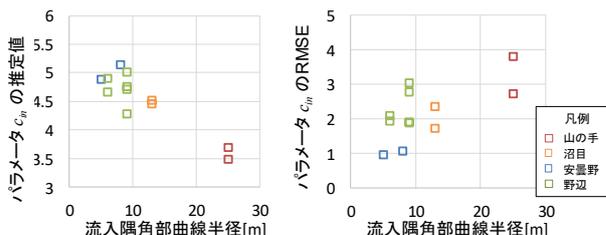
本研究では、異なる幾何構造を有する4か所のラウンドアバウトにおいてUAVによる撮影調査を実施し、直進車両の走行挙動特性と幾何構造との関係性について分析した。その結果、流入部・環道部・流出部における曲線半径が、流入から流出までの一連の走行挙動の中でクリティカルな要素となっていることが明らかとなった。また、このときの速度ー曲線半径の関係から導かれるパラメータcと幾何構造条件との関係から、ラウンドアバウトの幾何構造設計を検討するにあたり、安全性の確保の観点から留意すべき事項を整理した。具体的には、以下の事項が挙げられる。

- ・ 流入隅角部の曲線半径が大きい場合、走行性は確保される一方、車両間の走行挙動のばらつきが大きくなる。従って、過剰に大きい隅角部曲線半径は避けることが望ましい。
- ・ 流入部間の交差角度が180°より小さい場合、車両間の走行挙動のばらつきが大きくなる。このような場合、外径を大きくし横方向振れ幅を確保することが有効である。

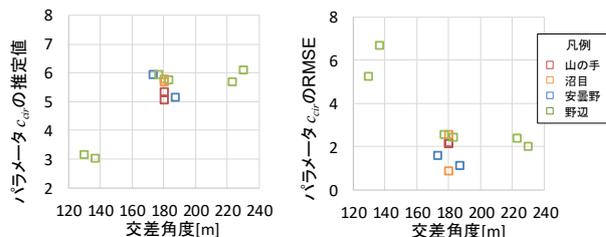
今後は、特に走行挙動に大きな影響を及ぼすと考えられる、外径・環道幅員・流入部間の交差角度等について、構造条件のパターンを増やしたうえで比較することが必要である。

**表 3 各種幾何構造要素とパラメータcとの相関**

	cの推定値との相関			cの標準偏差との相関		
	流入部	環道部	流出部	流入部	環道部	流出部
交差角度	0.01	0.71	0.02	0.03	-0.52	-0.01
外径	0.77	-0.17	0.80	-0.24	0.26	-0.71
流入角度	0.64	0.03	-	-0.58	-0.06	-
流入隅角部曲線半径	0.71	0.03	-	-0.28	-0.04	-
流入部幅員	-0.89	0.08	-	0.41	-0.21	-
分離島長さ	-0.14	0.49	-	-0.53	-0.53	-
テーパー長	0.53	0.33	-	0.06	-0.17	-
流出角度	-	0.29	0.61	-	-0.10	-0.60
流出隅角部曲線半径	-	-0.12	0.50	-	0.44	-0.54
流出部幅員	-	0.33	-0.54	-	-0.50	0.40



**図 6 流入隅角部曲線半径とパラメータcの相関**



**図 7 流出入口交差角度とパラメータcの相関**

**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) (公財)国際交通安全学会：ラウンドアバウトの社会実装と普及促進に関する研究(III)報告書，2015.
- 3) 吉岡慶祐・中村英樹・下川澄雄・森田緯之・小久保智明：ラウンドアバウトの走行安全性照査手法に関する検討，土木計画学研究・講演集，Vol.52，CD-ROM，2015.
- 4) 鈴木一史・中村英樹：交通流解析のためのビデオ画像処理システムTraffic Analyzerの開発と性能検証，土木学会論文集D，Vol.62，No.3 pp.276-287，2006.7.