

## 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、ラウンドアバウト特有の走行挙動特性と幾何構造の関係性は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 7 箇所のラウンドアバウトにおいて、UAV(無人航空機)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出入部交差角度が、車両に加わる横方向加速度に対して重要な要素であることを明らかにした。さらに、過剰に大きい隅角部曲線半径や、流出入部交差角度が 150°より小さい場合、車両に加わる横方向加速度が小さくなり、速度抑制が得られにくい構造であることを示した。

For the safety performance and smooth operation of roundabouts, designing geometric elements that can realize appropriate driving behavior is an important issue, particularly regarding the S-shaped trajectory which is different from ordinary cross intersections. However in Japan, this kind of driving behavior characteristics on roundabouts has not yet been studied enough. In this study, video surveys for driving behavior by using an UAV were carried out at seven roundabouts with different geometric design and the impact of geometric design elements on driving behavior are analyzed. As a result, the entry corner radius and the turning angle which is formed by entry and exit legs are shown as critical factors for the lateral acceleration applied to the vehicle. Moreover, it is shown that oversized entry corner radius and turning angle smaller than 150 degrees could lead to lower lateral acceleration and result in lower speed control effect on straight through vehicles.

**Keywords:** ラウンドアバウト, 走行挙動, 幾何構造設計

Roundabout, Driving Behavior, Geometric Design

### 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・設計に関する技術指針である「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において幾何構造設計が重要である。特に直進で通過する際は、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。ラウンドアバウトの幾何構造設計においては、このような走行挙動特性を把握したうえで検討を進めることが重要である。しかしながら、ラウンドアバウト特有の

- 
- 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 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
  - 4 正会員, 工学博士, 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

走行挙動特性と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ける実地調査に基づき, 流入から流出までの走行挙動プロセスを把握する。また, 幾何構造と走行挙動の関係に関する分析の一つとして, S字走行において生じる横方向加速度に着目し, 各種幾何構造要素が横方向加速度に与える影響を明らかにする。さらには, 速度抑制の観点から幾何構造設計において留意すべき事項を示すことを目的とする。

## 2. ラウンドアバウト幾何構造設計に関する知見の整理と本研究の位置づけ

### 2.1 ラウンドアバウトマニュアル

平成28年4月に発刊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種幾何構造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・研究で得られた知見を踏まえたものとなっている。しかし, 我が国における調査・研究は必ずしも十分とは言えず, 一部の幾何構造要素については, 具体的な設計の諸元まで示されていない。例えば流入部の形状については「流入速度をできる限り抑制するように」との記述があるが, これを保証するための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方法の確立が求められている。

以上のように, 現行のラウンドアバウトマニュアルは, 今後も検討すべき課題が散在している状況にあるが, これらの課題の多くは, 我が国ではラウンドアバウトの導入経験が少なく, 十分なデータの取得ができなかったことに起因する側面もある。

### 2.2 ラウンドアバウトの走行挙動に関する既往研究

これまでにラウンドアバウトが導入された箇所では, いくつかの既往研究において調査が実施されており, 走行挙動に関する知見も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。

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。

鈴木ら<sup>4)</sup>は, ラウンドアバウトの流入時・流出時の安全確認行動に着目した走行挙動調査から, 流入部によって安全確認位置やその際の走行挙動特性に違いがあることを示している。また流出時においては, 流出部の横断歩道の有無や分離島の有無によって減速度が異なることを示している。

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箇所の条件下での調査結果に基づくものが中心であった。これに対し本研究は, 複数の異なるラウンドアバウトでの調査から, 各幾何構造要素が走行挙動に与える影響について明らかにするものであり, これまでの既往研究では十分に把握できていない走行挙動と幾何構造の関係について着目する。

### 2.3 海外の設計指針や既往研究における知見

海外では, 幾何構造と車両挙動に関する研究からいくつかの知見が得られており, これらの知見を基に幾何構造設計の中で活用している例もある。

アメリカのガイドライン<sup>5)</sup>では, 幾何構造設計のプロセスの中で, 図面上の幾何構造から走行速度を推定し, 必要に応じて設計の見直しにフィードバックするといったような安全性能照査の方法を示している。具体的には, 幾何構造に対して車両の走行軌跡を進行方向別に予測し, 流入部・環道内・流出部における軌跡の曲線半径から走行速度を推定するものである。これは, アメリカ国内の90箇所のラウンドアバウトにおける調査<sup>6)</sup>により, 軌跡の曲線半径と速度の関係をモデル化した研究成果に基づいたものである。

またドイツの設計ガイドライン<sup>7)</sup>では, 流入部とエプロンの位置関係から算出される「横方向振幅」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, 横方向振幅が直進車両の走行軌跡や走行速度に大きく影響するとの研究成果によるものである。

その他にも, 幾何構造と走行挙動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もいくつか存在する。例えばBassaniら<sup>8)</sup>やBasharら<sup>9)</sup>は, 重回帰分析を用いて, 各種幾何構造要素を説明変数として環道内の速度の85パーセントイル値の推定モデル式を得ている。

しかし, 海外諸国と日本ではラウンドアバウトの導入経験に差があることや, 海外のラウンドアバウトは複数車線で外径の大きいものも多く見られ, 我が国のラウンドアバウトとは構造特性が異なることなどから, 海外の知見をそのまま我が国に適用することは望ましくないと考えられる。

表1 調査対象箇所

箇所名	山の手 (焼津市)	沼目 (須坂市)	安曇野 (安曇野市)	尾倉 (北九州市)
ビデオ撮影 画角例  ※写真中のアルファベットは流入部名称を示す				
分析対象方向	W→E E→W	N→S S→N	NW→E E→NW	E→W E→S

箇所名	角田浜 (新潟市)	野辺 (須坂市)	東和町 (飯田市)
ビデオ撮影 画角例  ※写真中のアルファベットは流入部名称を示す			
分析対象方向	SW→N, SW→SE N→SE, N→SW SE→SW, SE→N	N→S, N→SW SE→SW S→N SW→N, SW→SE NW→SE	N→S E→SW, E→W S→W, S→N SW→N, SW→E W→E

### 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、表1に示すように、異なる幾何構造を有する7箇所のラウンドアバウトにおいて、計29の進行方向を対象とし、走行挙動データを取得するための調査を実施した。これらの対象箇所における幾何構造条件の範囲は表2のとおりであり、各幾何構造要素の定義は、図1に示すとおりである。

「山の手」「沼目」はいずれも4枝で流入部が正十字に接続するが、「山の手」はセミトレーラ連結車の通行を担保するため、流入隅角部の曲線半径を大きくとっている。同じ4枝であるが、「安曇野」は交差角度が流入部によって異なっており、「尾倉」は外径が大きいことが特徴である。また、「角田浜」は3枝、「野辺」「東和町」は5枝であり、対象とする進行方向によって流出入口交差角度が異なっている。

#### 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走行挙動を取得するため、上空からのビデオ撮影調査を実施した。このうち、建物屋上からの撮影が困難な箇所については、UAV(Unmanned Aerial Vehicle：無人航空機)を活用することとした。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く。補正後の映像データから、車両の前面中

表2 対象箇所の幾何構造要素条件の範囲

幾何構造要素	構造条件
枝数	3枝~5枝
外径	27m~44m
環道幅員	5.0m~5.5m
エプロン幅員	2.0m~3.0m
流出入口交差角度	110°~250°
流入部接続角度	46°~63°
流入部幅員	2.5m~3.1m
流入隅角部曲線半径	5m~30m
分離島幅	0m~3m
分離島長さ	0m~30m
流出部接続角度	41°~61°
流出部幅員	2.75m~4.0m
流出隅角部曲線半径	3m~40m

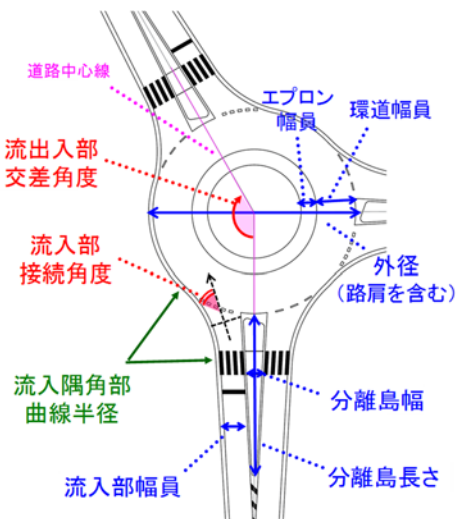


図1 各種幾何構造要素の定義

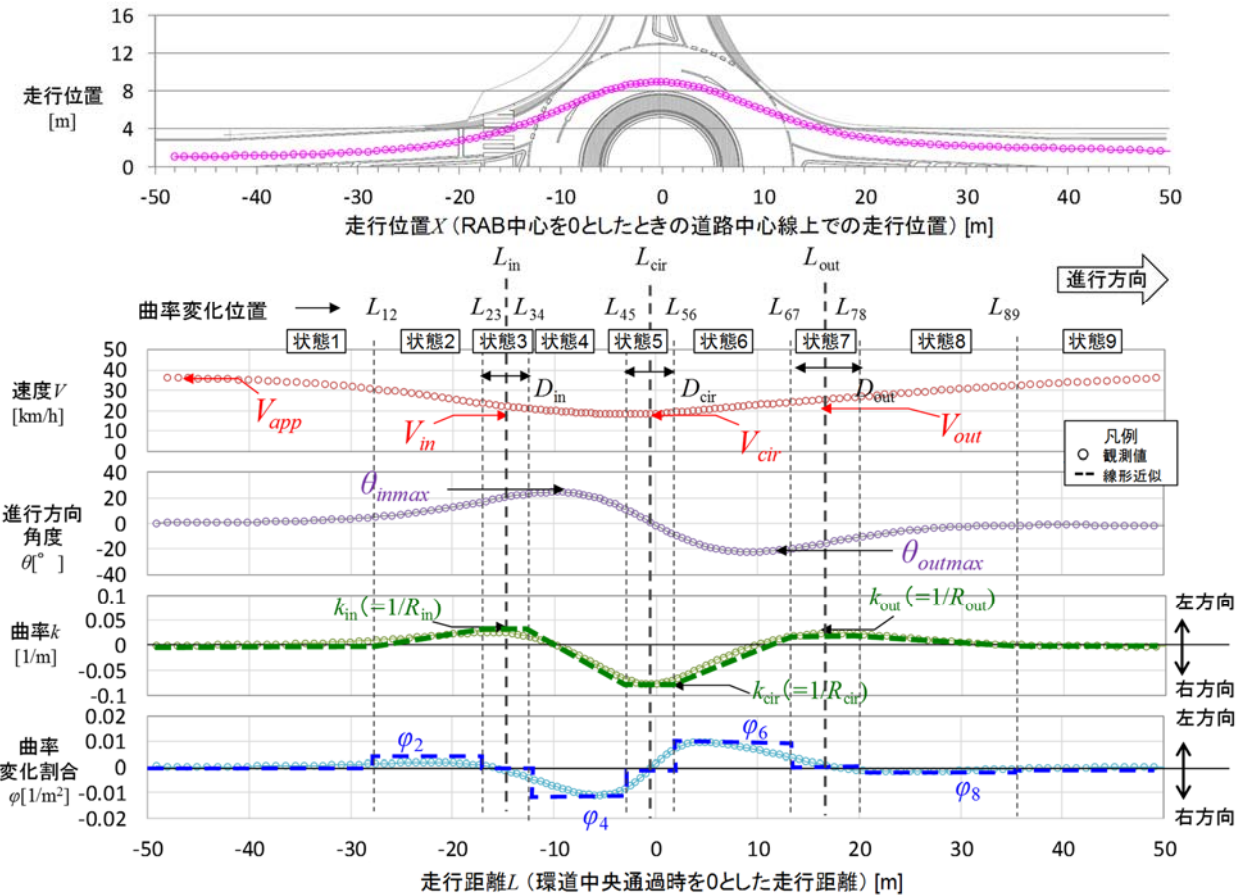


図2 各種走行挙動プロファイルの例と挙動パラメータの定義

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。さらに、カルマンフィルターによる平滑化処理により読み取り誤差を除くとともに、0.1秒ごとの挙動データに補間処理を行った。取得した0.1秒単位の離散的な位置データから、速度、進行方向角度(図2に示す道路中心線に対する車両の進行方向角度)、曲率等の走行挙動データを算出した。なお、本研究における道路中心線とは、上下方向を合わせた道路横断面の中心位置を結ぶ線であり、流入部の線形を示すものとして定義している。これら一連の作業については、交通流解析ソフト「Traffic Analyzer」<sup>10)</sup>を用いて実施した。なお、曲率は進行方向角度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扱っている。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。

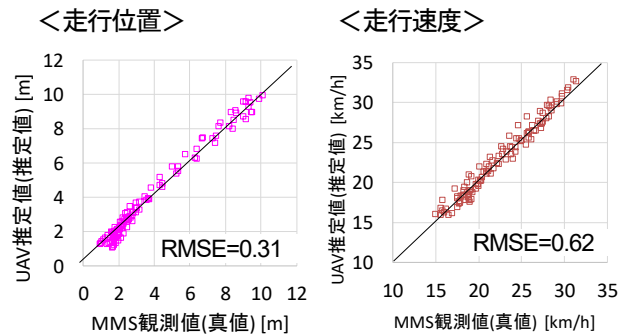


図3 UAVによる取得データの精度検証結果

なお、山の手ラウンドアバウトにおいては、UAVの映像により取得された車両挙動データの精度を検証するため、ニコン・トリンブル社製のモバイルマッピングシステム(MMS)「Trimble MX8」を搭載した調査車両を走行させ、緯度・経度の計測を実施した。その結果、図3に示すように、MMSによる観測値とUAVによる推定値には大きな誤差は無く、走行位置については最大でも0.4m程度であった。なお、平均2乗誤差(RMSE)は、走行位置について約0.3m、走行速度について約1km/hであった。



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，走行軌跡，速度，進行方向角度，軌跡の曲率・曲率の変化割合(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に着目すると，流入部・環道部・流出部において曲率の極値が3回発生していることが分かる。このような曲率の極値を示す地点は，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操作の切り返し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，流入部から環道部の間で逆方向へのステアリング操作が連続的に生じていることがわかる。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 走行挙動パラメータの取得

4.1で述べたステアリング操作について詳細な分析を行うため，曲率の変化位置や曲率の極値が発生する時点の速度などを走行挙動パラメータとして取得し，それらの関係性を見ることで走行挙動プロセスを把握することを考える。なお，ここではUAVの撮影により流入部から流出部まで100mの区間に渡ってデータの取得ができた2点(山の手，沼目)を対象とする。

上記の走行挙動パラメータを取得するため，図2の破線で示すように，各車両の曲率が走行距離に対して一定の割合で変化するものと仮定する。すなわち，ステアリングの操作速度が一定のクロソイド走行を仮定したことに同義である。このとき，ラウンドアバウトを直進で通過する際は，図2に示すように走行状態1から走行状態9のように9段階の曲率変化の組合せで構成される。それぞれの走行状態*i*における曲率*k<sub>i</sub>*は，曲率変化位置と流入時・環道内・流出時の曲率の極値の関数として，それぞれ式(1)のように定式化できる。

$$k_i(L) = \begin{cases} 0 & L \leq L_{12} \\ \varphi_2 \cdot L - \varphi_2 \cdot L_{12} & L_{12} \leq L \leq L_{23} \\ k_{in} & L_{23} \leq L \leq L_{34} \\ \varphi_4 \cdot L + \frac{L_{34}k_{in} - L_{23}k_{cir}}{L_{34} - L_{23}} & L_{34} \leq L \leq L_{45} \\ k_{cir} & L_{45} \leq L \leq L_{56} \\ \varphi_6 \cdot L + \frac{L_{56}k_{cir} - L_{45}k_{out}}{L_{56} - L_{45}} & L_{56} \leq L \leq L_{67} \\ k_{out} & L_{67} \leq L \leq L_{78} \\ \varphi_8 \cdot L - \varphi_8 \cdot L_{78} & L_{78} \leq L \leq L_{89} \\ 0 & L_{89} \leq L \end{cases} \quad (1)$$

表3 曲率パラメータの推定値と標準偏差

走行位置 パラメータ	山の手		沼目	
	W→E (n=32)	E→W (n=23)	N→S (n=13)	S→N (n=11)
<i>L</i> <sub>12</sub>	-33.52 (6.98)	-33.25 (6.22)	-27.99 (5.06)	-28.34 (4.24)
<i>L</i> <sub>23</sub>	-17.54 (2.87)	-18.15 (2.49)	-15.96 (2.02)	-17.48 (1.43)
<i>L</i> <sub>34</sub>	-13.80 (1.58)	-12.91 (2.26)	-12.67 (1.33)	-14.21 (1.08)
<i>L</i> <sub>45</sub>	-3.13 (2.04)	-1.71 (1.50)	-2.43 (0.95)	-2.87 (1.07)
<i>L</i> <sub>56</sub>	0.50 (1.27)	1.83 (1.45)	0.16 (0.88)	0.27 (0.97)
<i>L</i> <sub>67</sub>	11.58 (1.74)	11.51 (1.67)	10.42 (1.77)	10.88 (1.34)
<i>L</i> <sub>78</sub>	17.13 (3.93)	16.08 (2.59)	17.53 (3.74)	16.52 (2.41)
<i>L</i> <sub>89</sub>	38.27 (9.60)	31.57 (7.02)	36.07 (3.45)	35.76 (4.86)
<i>k</i> <sub>in</sub> (=1/ <i>R</i> <sub>in</sub> )	3.66*10 <sup>-2</sup> (1.59*10 <sup>-2</sup> )	3.17*10 <sup>-2</sup> (1.22*10 <sup>-2</sup> )	4.51*10 <sup>-2</sup> (1.68*10 <sup>-2</sup> )	4.51*10 <sup>-2</sup> (1.38*10 <sup>-2</sup> )
<i>k</i> <sub>cir</sub> (=1/ <i>R</i> <sub>cir</sub> )	-7.44*10 <sup>-2</sup> (1.82*10 <sup>-2</sup> )	-7.74*10 <sup>-2</sup> (1.42*10 <sup>-2</sup> )	-8.49*10 <sup>-2</sup> (1.99*10 <sup>-2</sup> )	-7.87*10 <sup>-2</sup> (1.36*10 <sup>-2</sup> )
<i>k</i> <sub>out</sub> (=1/ <i>R</i> <sub>out</sub> )	2.56*10 <sup>-2</sup> (8.24*10 <sup>-3</sup> )	3.28*10 <sup>-2</sup> (1.35*10 <sup>-2</sup> )	2.26*10 <sup>-2</sup> (3.71*10 <sup>-3</sup> )	2.62*10 <sup>-2</sup> (8.78*10 <sup>-3</sup> )

※()内は標準偏差を示す

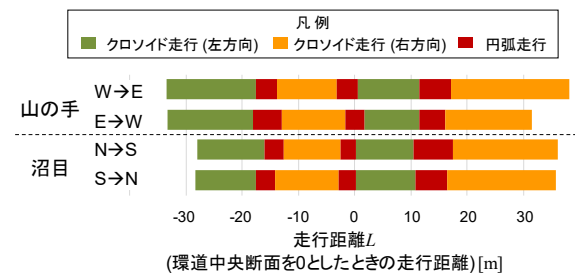


図4 曲率の変化位置の推定結果

ここに，*k<sub>i</sub>*: 走行状態*i*における曲率，*L*: 走行距離(ラウンドアバウトの環道中央断面通過時を0とし，進行方向を正とした距離)，*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極値である。

また， $\varphi_2, \varphi_4, \varphi_6, \varphi_8$ 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 $\varphi_4$ は，一定の曲率変化を仮定するため式(3)で表される。

$$\varphi_4 = \frac{k_{cir} - k_{in}}{L_{45} - L_{34}} \quad (2)$$

各車両の走行挙動データから，曲率の変化位置および流入時・環道内・流出時の曲率の極値を推定する。すなわち，式(1)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中心から前後50mずつの走行区間について，式(3)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。

表4 各種挙動パラメータ間の相関係数行列表

アプローチ部	アプローチ速度	$V_{app}$	1.00																		
	ステアリング開始位置	$L_{12}$	-0.19	1.00																	
流入曲率最大時	流入最大曲率位置	$L_{in}$	-0.15	0.54	1.00																
	流入部円弧走行区間長	$D_{in}$	0.11	-0.52	-0.41	1.00															
	流入時最小曲線半径	$R_{in}$	0.22	-0.84	-0.53	0.78	1.00														
流入断面	流入速度	$V_{in}$	0.48	-0.69	-0.59	0.57	0.73	1.00													
	流入断面進行方向角度	$\theta_{inmax}$	-0.20	0.04	-0.15	-0.30	-0.38	-0.18	1.00												
	流入断面走行位置	$Y_{in}$	0.12	-0.56	-0.50	0.46	0.63	0.46	-0.16	1.00											
環道内曲率最大時	環道最大曲率位置	$L_{cir}$	-0.06	-0.33	-0.09	0.51	0.50	0.32	-0.38	0.27	1.00										
	環道内円弧走行区間長	$D_{cir}$	-0.17	0.34	0.17	-0.43	-0.28	-0.41	0.05	-0.20	-0.29	1.00									
	環道内最小曲線半径	$R_{cir}$	-0.25	0.44	0.65	-0.10	-0.53	-0.52	0.21	-0.43	0.09	-0.34	1.00								
	環道速度	$V_{cir}$	0.47	-0.44	-0.51	0.14	0.43	0.78	-0.04	0.31	-0.12	-0.02	-0.76	1.00							
流出断面	環道中央断面走行位置	$Y_{cir}$	-0.25	0.43	0.54	-0.13	-0.49	-0.48	0.25	-0.17	0.10	-0.13	0.69	-0.62	1.00						
	流出断面進行方向角度	$\theta_{out}$	0.22	0.12	0.18	-0.08	-0.02	-0.02	-0.31	-0.24	-0.18	-0.06	-0.03	-0.01	-0.27	1.00					
	流出断面走行位置	$Y_{out}$	0.37	-0.21	-0.07	0.06	0.20	0.33	-0.32	0.18	0.00	-0.06	-0.36	0.38	-0.18	0.02	1.00				
流出曲率最大時	流出最大曲率位置	$L_{out}$	0.21	-0.40	-0.58	0.19	0.42	0.52	-0.03	0.38	-0.11	0.06	-0.53	0.58	-0.54	-0.27	0.39	1.00			
	流出部円弧走行区間長	$D_{out}$	0.36	-0.02	-0.14	0.12	0.14	0.21	-0.14	0.11	-0.32	-0.07	-0.30	0.34	-0.23	0.19	0.31	0.51	1.00		
	流出時最小曲線半径	$R_{out}$	0.41	-0.07	-0.26	0.11	0.29	0.32	-0.21	0.16	-0.31	0.19	-0.60	0.54	-0.47	0.34	0.35	0.40	0.59	0.40	1.00
	流出速度	$V_{out}$	0.54	-0.24	-0.44	0.01	0.22	0.55	-0.09	0.17	-0.39	-0.08	-0.59	0.81	-0.52	0.19	0.46	0.53	0.58	0.68	1.00
	$V_{app}$	$L_{12}$	$L_{in}$	$D_{in}$	$R_{in}$	$V_{in}$	$\theta_{inmax}$	$Y_{in}$	$L_{cir}$	$D_{cir}$	$R_{cir}$	$V_{cir}$	$Y_{cir}$	$\theta_{out}$	$Y_{out}$	$L_{out}$	$D_{out}$	$R_{out}$	$V_{out}$		
	アプローチ部	流入曲率最大時	流入断面	環道内曲率最大時	流出断面	流出曲率最大時															

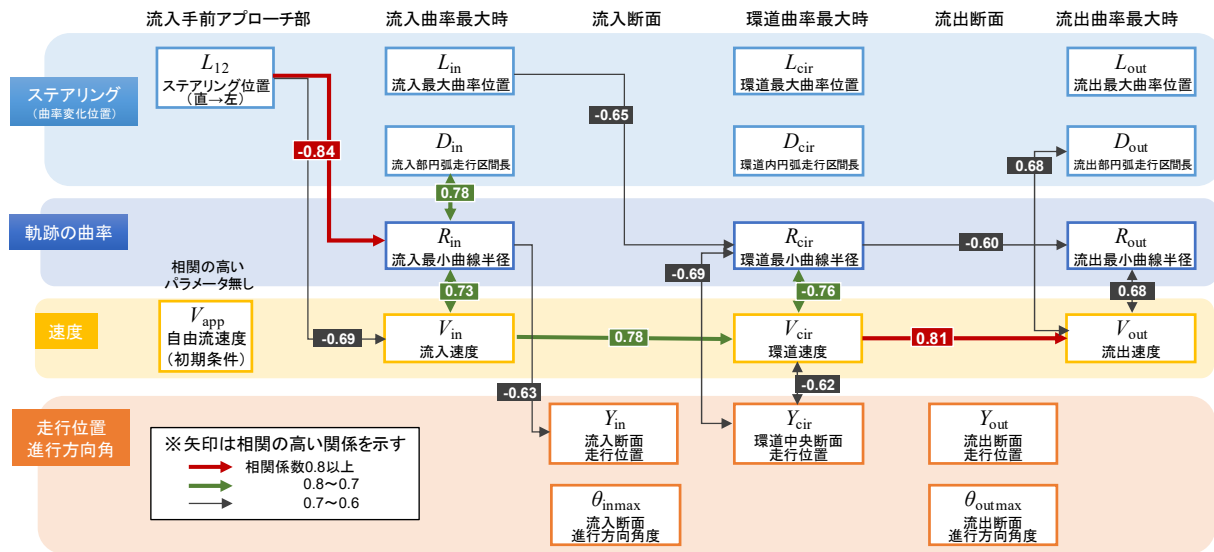
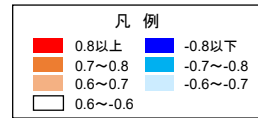


図5 各種挙動パラメータ間の相関関係模式図

$$\Phi^* = \operatorname{argmin} \left[ \sum_{L=-50}^{50} \left\{ k(L|\Phi) - \frac{d\theta}{dL}(L) \right\}^2 \right] \quad (3)$$

ここに、 $\Phi^*$ は式(4)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。

$$\Phi = \begin{pmatrix} L_{12} \\ L_{23} \\ \vdots \\ L_{89} \\ k_{in} \\ k_{cir} \\ k_{out} \end{pmatrix} \quad (4)$$

表3は、車両ごとに推定されたパラメータの推定値の平均値と標準偏差を進行方向別に示したものである。また図4は、表3で得られたパラメータを用いて、クロソイド走行・円弧走行の走行状態別に色分けして表示したものである。例えば、 $L_{12}$ から $L_{23}$ の間は、式(1)に示すように軌跡の曲率 $k$ が走行距離 $L$ に対して比例関係にあるため、クロソイド曲線に沿った走行軌跡となる。一方、 $L_{23}$ から $L_{34}$ の間は、軌跡の曲率が一定であるため、円弧に沿った

走行軌跡となる。流入部から流出部までを見ると、短い走行位置の中でクロソイド走行・円弧走行が連続して発生しているが、特にラウンドアバウトの環道内を通過する際は、わずかに数mの円弧走行の区間長となっており、S字走行の中でもクリティカルなポイントであると言える。

### 4.3 流入から流出までの走行挙動プロセス

4.2で推定した走行挙動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。表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相関係数を算出し、表に整理したものである。また、図5はその結果の解釈を分かりやすくするため、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)関係のみ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・流出部の最大曲率発生位置( $L_{in}$ ,  $L_{cir}$ ,  $L_{out}$ )は、図2に示すように、軌跡の曲率が一定である円弧走行区間の中間点と定義し、

例えば流入部の最大曲率発生位置  $L_m$  とその区間長  $D_m$  は、以下の式(5)(6)により算出される。

$$L_{in} = \frac{L_{23} + L_{34}}{2} \quad (5)$$

$$D_m = L_{23} - L_{34} \quad (6)$$

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

図5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  $L_{12}$  が流入時の曲線半径  $R_m$  と負の強い相関があり、最初の曲率変化位置  $L_{12}$  が小さい(環道から遠い)ほど、流入時の最小曲線半径  $R_m$  が大きい(緩やかな走行)。これは、ステアリングを切り始める位置が流入時のステアリングの程度に大きく影響することを示している。次に環道部では、軌跡の曲線半径や速度、走行位置の間にそれぞれ相関が見られている。また、流入部・環道部・流出部ともに、軌跡の曲線半径と速度の間に一定の相関が見られており、ラウンドアバウトの一連の走行の中で、軌跡の曲線半径(曲率)が速度に影響していることがわかる。これは、アメリカのガイドラインに示される、軌跡の曲線半径(曲率の逆数)による速度推定方法の妥当性を示す結果であるとも言える。

## 5. 横方向加速度に基づく幾何構造の評価

### 5.1 横方向加速度

前章の分析において、流入から流出までの走行挙動の中で、速度と軌跡の曲線半径(曲率の逆数)の間に相関が見られた。これは環道内でのステアリング操作によって生じる横方向加速度が速度に大きな影響を与えているためであると考えられる。車両が曲線部を走行する際に加わる横方向加速度  $a_{L,i}$  は、4.2 で推定した走行挙動パラメータのうち、流入時・環道内・流出時の軌跡の曲率極値  $k_{in}$ ,  $k_{cir}$ ,  $k_{out}$  と、その地点の速度  $v_{in}$ ,  $v_{cir}$ ,  $v_{out}$  を用いて、式(7)のように示される。

$$a_{L,i} = \frac{(v_i/3.6)^2}{9.8 \cdot R_i} = \frac{k_i \cdot v_i^2}{127} \quad (7)$$

ここに、 $a_{L,i}$ : 横方向加速度[G]、 $v_i$ : 速度[km/h]、 $k_i$ : 軌跡の曲率[1/m]、 $R_i$ : 軌跡の曲線半径[m]であり、 $i$ はそれぞれ流入時(in)、環道内(cir)、流出時(out)を示す。

適度な横方向加速度が生じるような幾何構造とすることで速度は抑制される一方、過剰な横方向加速度の発生は、車両の制御を失うことにも繋がると考えられる。ラウンドアバウトの設計においては、これらのバランスを想定したうえで幾何構造の検討を行う必要がある。従って、横方向加速度がどの程度生じているか、あるいは

表5 各種幾何構造要素と横方向加速度の相関係数

	流入時 $a_{L,in}$	環道内 $a_{L,cir}$	流出時 $a_{L,out}$
流出入口交差角度	0.03	0.81	0.09
外径	-0.04	-0.19	-0.21
環道幅員	-0.38	-0.10	-0.28
流入部幅員	-0.22	0.04	—
流入隅角部曲線半径	-0.77	-0.22	—
流入部接続角度	0.24	0.06	—
分離島幅	-0.12	-0.20	—
分離島長さ	0.21	0.19	—
流出部幅員	—	-0.12	-0.13
流出隅角部曲線半径	—	-0.15	-0.57
流出部接続角度	—	0.21	0.42

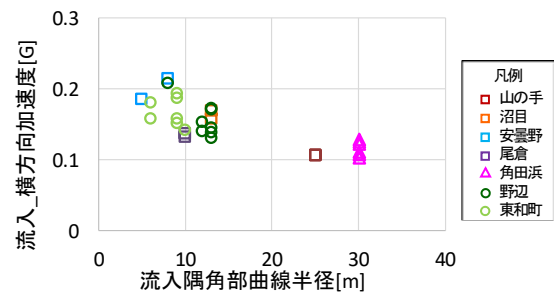


図6 流入隅角部曲線半径と横方向加速度の相関

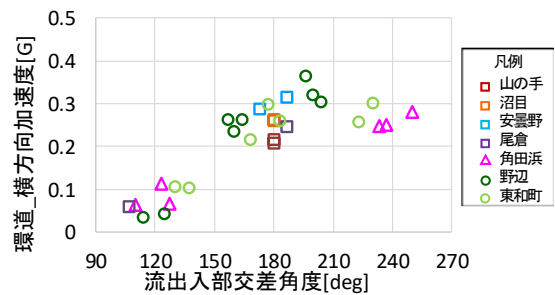


図7 流出入口交差角度と横方向加速度の相関

幾何構造との関係性などを把握しておくことは重要である。以上を踏まえ、本章では横方向加速度に着目した分析を行う。

### 5.2 幾何構造条件が横方向加速度に与える影響

表5は、流入時・環道内・流出時に生じる横方向加速度の平均値と、表2に示した各種幾何構造要素との相関係数を示したものである。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) 流入隅角部曲線半径

まず表5の流入部に注目すると、横方向加速度に対して流入隅角部の曲線半径が最も強い相関がある。図6はこの関係を散布図にして見たものである。これによると、流入隅角部の曲線半径が大きいほど横方向加速度の値は小さくなり、流入隅角部の曲線半径が25mまたは30mである山の手や角田浜の横方向加速度は、わずかに0.1G程度である。これは、乗り物に着席している状態において、

ほとんど不快を感じない横方向加速度であるとされている<sup>1)</sup>。従って、スムーズに流入できる構造である一方、速度抑制の余地が十分に残っているとも考えられる。幾何構造設計の観点からは、流入部における速度抑制がとくに必要な箇所においては、流入隅角部の曲線半径を大きくし過ぎないことが重要であると言える。

### (b) 流出入部交差角度

次に表5の環道部に着目すると、環道における横方向加速度と流出入部間の交差角度に強い相関が見られる。図7はこの関係を散布図にして見たものである。これによると、流出入部交差角度が大きいほど横方向加速度は増加するが、150°程度を境界として、それ以上の流出入部交差角度では横方向加速度の値は0.3G前後に落ち着いていることがわかる。一般的に、0.3Gの横方向加速度は、旋回における車両性能上の限界値には至らないものの走行時に不快を感じる大きさである<sup>1)</sup>。この程度の横方向加速度が生じるラウンドアバウトにおいては、これ以上の速度を出すことは物理的に不可能であり、速度抑制の効果が発揮されていると考えられる。これに対して流出入部間の交差角度が150°より小さい方向では、0.1G程度の横方向加速度しか得られていない。これは、環道内においてエプロンや中央島を回避するためのステアリング操作が小さいためである。従って、流出入部間で交差角度の小さい進行方向が存在する場合、このような進行方向の走行軌跡に留意したうえで、外径を大きくするなどによりステアリング操作が生じるような幾何構造とすることが速度抑制の観点で重要である。

## 6. まとめ

本研究では、異なる幾何構造を有する7か所のラウンドアバウトにおいて上空からの撮影調査を実施し、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、ラウンドアバウトの中心を通過する際に短い区間内でのステアリング操作が連続で生じており、さらに軌跡の曲線半径が速度に大きく影響していることが明らかとなった。

また、横方向加速度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留意すべき事項を整理した。その結果、過剰に大きい隅角部曲線半径や、流出入部交差角度が150°より小さい場合において、直進または斜め方向に走行する車両に加わる横方向加速度が小さくなり、速度抑制が得られにくい構造であることを示した。

しかし、本研究は限られた幾何構造条件の中で得られた結果である。今後は、幾何構造条件のパターンを増やすとともに、各種幾何構造要素の組合せによる走行挙動への影響についても把握する予定である。さらに幾何構造条件を入力変数とした走行挙動モデルを構築し、これ

を用いた幾何構造設計の評価方法と実設計への適用について検討する予定である。

## 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) (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) 鈴木弘司・安田宗一郎・森本清誠:走行調査と観測調査に基づいた複数のラウンドアバウトにおける安全確認行動と車両挙動の分析, 土木学会論文集D3, Vol.72, No.5, I\_1133-I\_1143, 2016.
- 5) Transportation Research Board (TRB): National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 672 Roundabouts: An Informational Guide Second Edition, 2010.
- 6) Transportation Research Board (TRB): National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 572 Roundabouts in the United States, 2007.
- 7) Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen (FGSV): Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehren, 2006.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 茄子川捷久・宮下義孝・汐川満則:自動車の走行性能と試験法, 東京電機大学出版局, 2008.

(受付日 2017年9月4日 受理日 2018年1月11日)