

リスク指標を用いたラウンドアバウト幾何構造の安全性能評価 Safety Performance Evaluation of Roundabout Geometric Design by Using a Risk Index

吉岡 慶祐¹, 中村 英樹², 下川 澄雄³, 森田 綽之⁴

Keisuke YOSHIOKA¹, Hideki NAKAMURA², Sumio SHIMOKAWA³ and Hirohisa MORITA⁴

ラウンドアバウトの幾何構造設計では、単に幾何構造要素の寸法を決定する仕様設計ではなく安全性能照査型の設計手法が求められる。しかし、我が国では安全性能照査型の設計を行うための評価方法や評価指標はこれまで検討されていない。

そこで本研究は、ラウンドアバウト幾何構造の安全性能評価指標として、事故の起きやすさを示す見落とし確率と事故が起きた時の重度を示す衝突強度の積で表されるリスク指標を提案した。また、リスク指標による幾何構造の評価から、6mを上回る環道幅員や15~20mを上回る隅角部曲線半径は、リスク指標の観点からは不適切であることを明らかにした。さらにリスク指標による既存のラウンドアバウトの評価により、エプロン段差が無いなどの幾何構造の問題点を定量的に抽出し評価指標としての活用可能性を示した。

Keywords: ラウンドアバウト, 幾何構造, 安全性能, 評価指標

1. はじめに

ラウンドアバウトは信号制御を行わないことから、安全性能を確保するためには幾何構造設計が重要となる。ラウンドアバウトの幾何構造設計は、外径、環道幅員、流入隅角部などの様々な幾何構造要素によって構成され、それらの組合せによって車両の走行挙動は大きく異なることが想定される。従って、単に幾何構造の寸法を決定していくような仕様設計の進め方ではなく、幾何構造全体に対して要求される安全性能が満たされるかどうかを評価し、もし満たされない場合には幾何構造設計を見直すといった安全性能照査型の設計手法が求められる。欧米を中心とした海外諸国では、各国の設計ガイドライン類の中で、安全性能の観点から幾何構造を評価する方法を提示しており、安全性能照査型の設計方法の枠組みが確立されている。しかし我が国では、海外のような幾何構造を評価するための具体的な評価方法や評価指標はこれまで検討されていない。

また、国内で環状交差点として運用されているラウンドアバウトの多くは、従来からロータリーとして存在していたものに区画線や歩車道境界ブロックの設置等の簡易な改良を施しただけであり、環道幅員が必要以上に広い、エプロンに段差が設置されていないなど幾何構造の問題点を有する箇所も散見される。ラウンドアバウトとしての本来の安全性能を発揮するために、現状の幾何構

造に対して安全性能を評価し、必要に応じて幾何構造改良等の対策が必要であると考えられる。このような既存ラウンドアバウトの改良を検討する側面からも、安全性能評価方法の確立は重要な課題であると考えられる。

以上を踏まえ、本研究ではラウンドアバウトの幾何構造設計における安全性能照査のための評価方法の確立に向けた検討の一つとして、事故の起きやすさと事故が起きた時の重度を考慮した評価指標であるリスク指標を提案し、安全性能評価指標としての活用可能性について検証することを目的とする。

2. 幾何構造の安全性能評価に関する知見の整理

2.1 我が国の幾何構造設計に関する知見

我が国のラウンドアバウト幾何構造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¹⁾では、幾何構造設計の基本的な考え方や各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・研究を踏まえて作成されたものであるが、安全性能評価に関してはその必要性については言及しているものの、定量的な評価方法は示されていない。一方近年では、既にラウンドアバウトが導入された箇所においていくつかの調査・研究も実施されており、幾何構造設計に関する知見も少しずつ増加して

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
〒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
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
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

いる。例えば、(公財)国際交通安全学会の研究プロジェクト²⁾では、焼津市山の手ラウンドアバウト社会実験中の環道幅員構成変更前後の比較から、環道幅員が広い場合、直線的な走行を招き、速度が高くなることを示している。飯田市吾妻町の調査では、歩車道境界ブロック等の設置による簡易的な流入部形状の改良により環道内での速度や走行位置が変化したことを示している。また小林ら³⁾は、試験場に設置されたエプロン段差の走行実験により、被験者の評価や挙動特性に基づいた適当なエプロン高さを示している。しかし、これらの既往研究は特定箇所または特定条件下での調査結果に基づくものや特定の幾何構造要素に対する分析に留まっており、幾何構造全体に対する安全性能を評価可能とするまでには至っていない。

2.2 海外の安全性能評価方法と課題

欧米を中心とした海外諸国では、各国のラウンドアバウト幾何構造設計に関するガイドライン等の中で、幾何構造の安全性能評価方法を提示している。これら海外諸国の評価方法に共通する基本的な思想は、筆者らの既往研究⁴⁾でも既に述べているが、「速度」を安全性能を規定する一つの代理指標として捉え、速度と幾何構造の関係を明らかにすることで幾何構造の安全性能を評価しようとするものである。例えばアメリカでは、概略設計の段階で図面上から想定される走行軌跡(Fastest Path)を描画し、その軌跡の曲線半径から速度を推定することで幾何構造を評価している。一方スイスでは、外径や幅員などの様々な幾何構造条件によって決定される幾何構造の代表要素(Deflection Angle)を定義し、Deflection Angleと速度の関係に基づき幾何構造全体を評価している。

このように、幾何構造条件から推定される速度を根拠として幾何構造を評価する考え方は合理的な方法の一つであると考えられるが、速度のみで安全性能のすべてを評価することについては議論の余地があると考えられる。とくにラウンドアバウトの最大の利点でもある重大事故の抑制効果は、速度が抑制されるだけではなく、環道に流入する際は合流に近い形式であるため衝突時の車両間の交錯角度が浅くなり致命的な事故になりにくいことの影響も大きい。一方、交錯角度が過剰に浅いと流入車両にとって環道車両を視認しにくくなる影響も考えられる。幾何構造設計においては、衝突につながるような危険現象の発生を抑制することと、仮に衝突が発生してもその程度を低減することの両面に配慮することが重要である。つまり、事故が発生しにくい幾何構造設計を考えるだけでなく、事故が起きたとしてもその被害の程度を最小限に留める設計の考え方も重要な視点の一つである。

海外のように速度のみを安全性能を代替する指標として考えた場合、事故の起きやすさや被害の程度はそれぞれ間接的に速度と関わると考えられるものの、これら

の両面を総合的に評価したものではない。従って、このような海外の評価方法の課題を補う新たな評価指標を検討することも考えられる。

3. 本研究におけるリスク指標の定義

前章で述べた海外の評価方法の課題を補うため、本研究では事故の起きやすさと事故が起きたときの重大さの組合せを表すリスク指標を定義し、安全性能を評価するための指標の一つとして用いることを考える。

リスクの本来的な定義は危害の発生確率とその危害の程度の組合せであり、一般的に期待値としてこれらの積で表現される。本研究においても、期待値として算出される物理量をリスクと捉えることとする。危害の発生確率すなわち事故の発生確率と幾何構造条件の関係については、本来は事故データをもとに検討すべきであるが、十分な事故の実績データが存在しない現状においては、その関係性を把握することは困難である。そこで、流入車両が環道に流入する際に環道車両を見落とし確率(見落とし確率)を危害の発生確率と置き換え、幾何構造から推定することを考える。危害の程度については、衝突時の運動エネルギー損失量を衝突時の強度に置き換えたAlhajascen⁵⁾の考え方を適用し、これが危害の程度に相当すると考える。

以上より、本研究におけるリスク指標を、以下の式(1)として定義する。

$$RI = P_{miss} \times I_{cs} \quad (1)$$

ここに、 RI : リスク指標(Risk Index)、 P_{miss} : 見落とし確率、 I_{cs} : 衝突強度である。

リスク指標は、流入車両と環道車両の出合い頭の衝突を想定したものであるが、これは幾何構造の評価に用いることを目的としており、流入部を中心とした幾何構造条件の影響を受けやすいと考えられる出合い頭の事故に着目するためである。

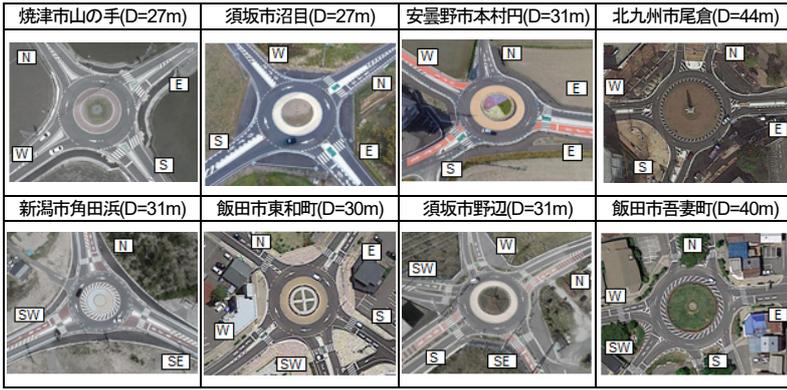
リスク指標の要素である見落とし確率と衝突強度を推定するには、幾何構造を条件として流入車両と環道車両が交錯する位置(交錯位置)を推定し、さらに交錯位置を通過する際の速度と交錯位置に至るまでの軌跡を推定することが必要となる。次章以降では、各種幾何構造条件を説明変数とした走行挙動推定モデルを検討し、リスク指標を算出するまでの方法を検討する。

4. 車両挙動モデリング

4.1 走行軌跡の再現方法

ラウンドアバウトにおける走行軌跡の再現については、既に筆者らの既往研究⁶⁾において、流入から流出までの曲率(進行方向角の走行距離に対する変化割合で定義

表1 車両挙動調査の対象箇所



※写真中のアルファベットは流入部名称を示す

され、ステアリングの程度を表す)の変化を線形近似することで、走行軌跡を直線・クロソイド・円弧の組合せとして表現できることを確認している。このように、曲率パラメータに基づいて走行軌跡を推定する方法は、例えばAlhajyaseenら⁷⁾の信号交差点における右左折車両の走行軌跡の推定においても用いられている手法であるが、ラウンドアバウトにおける曲率の変化は通常の右左折と比較して複雑となるため、推定に必要なパラメータが多いことが異なる点である。図2は、山の手ラウンドアバウトにおいて観測された走行挙動データの一例である。このとき、曲率の変化を線形要素の組合せとすると式(2)に示すように9段階で表現され、その曲率の変化位置(L_i)や曲率の値(k_i)を走行挙動パラメータとして定義する。

$$k_i(L) = \begin{cases} 0 & L \leq L_{BP} \\ \varphi_2 \cdot L - \varphi_2 \cdot L_{BP} & L_{BP} \leq L \leq L_{23} \\ k_{in} & L_{23} \leq L \leq L_{34} \\ \varphi_4 \cdot L + \frac{L_{34}k_{in} - L_{23}k_{cir}}{L_{34} - L_{23}} & L_{34} \leq L \leq L_{45} \\ k_{cir} & L_{45} \leq L \leq L_{56} \\ \varphi_6 \cdot L + \frac{L_{56}k_{cir} - L_{45}k_{out}}{L_{56} - L_{45}} & L_{56} \leq L \leq L_{67} \\ k_{out} & L_{67} \leq L \leq L_{78} \\ \varphi_8 \cdot L - \varphi_8 \cdot L_{EP} & L_{78} \leq L \leq L_{EP} \\ 0 & L_{EP} \leq L \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 k_i : 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_{ij} : 走行状態*i*から*j*へ変化する位置、 k_m , k_{cir} , k_{out} 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 φ_4 は、一定の曲率変化を仮定するため式(3)で表される。

$$\varphi_4 = \frac{k_{cir} - k_{in}}{L_{45} - L_{34}} \quad (3)$$

さらに、流入部・環道部・流出部の曲率最大位置(L_m, L_{cir}, L_{out})は、軌跡の曲率が一定である円弧走行区間の中間点

表2 調査対象箇所の幾何構造諸元

幾何構造要素	諸元範囲
枝数	3-5
外径[m]	27-44
流出入部間交差角度[deg]	110-250
環道幅員[m] (段差無しエプロン部を含む)	4.5-6.0
エプロン段差	あり・なし
流入部幅員[m]	2.5-3.1
流入隅角部曲線半径[m]	5-30
流入分離島幅[m]	0-3.0
流入部分離島長さ[m]	0-30
流出部幅員[m]	2.7-4.0
流出隅角部曲線半径[m]	3-40
流出分離島幅[m]	0-3.0

と定義し、例えば流入部の曲率最大位置 L_{in} は、以下の式(4)により算出される。

$$L_{in} = \frac{L_{23} + L_{34}}{2} \quad (4)$$

ここに、 L_{in} : 流入部曲率最大位置[m]である。

以上のような走行挙動パラメータが決定されれば、境界部での制約条件を与えることで、式(2)で示される曲率変化の2回積分として走行軌跡が推定される。

4.2 パラメータ推定結果

4.1の走行軌跡に関するパラメータと幾何構造との関係を把握するため、表1および表2に示す国内8箇所のラウンドアバウトの30の進行方向に対して走行挙動調査を実施し、得られた走行挙動データから重回帰分析により表3に示すパラメータを推定した。

まず外径や流出入部間交差角度については、流入から流出までのほとんどの走行軌跡に関するパラメータに対して有意であり、走行軌跡に影響の大きい幾何構造要素であると言える。このうち流入部曲率最大位置に着目すると、推定されたパラメータはいずれも符号が負になっている。これは、外径や交差角度が大きいほど流入時のステアリング操作位置がラウンドアバウトから遠いことを意味しており、外径や交差角度が大きいとラウンドアバウトを周回する際の走行距離が増えるためである。次に、曲率最大値について見ると、流入部・流出部については隅角部の曲線半径が、環道内については流出入部間交差角度が影響の大きい幾何構造要素であることがわかる。

4.3 走行速度の再現方法

走行速度の再現については、アメリカの軌跡に基づく速度の推定方法の考え方を適用し、図1に示すように曲率が極値を取る流入部 L_{in} 、環道内 L_{cir} 、流出部 L_{out} の3地点における速度 V_{in}, V_{cir}, V_{out} を曲率(曲線半径の逆数)から推定し、この間は等加速度を仮定して便宜的に直線で補間

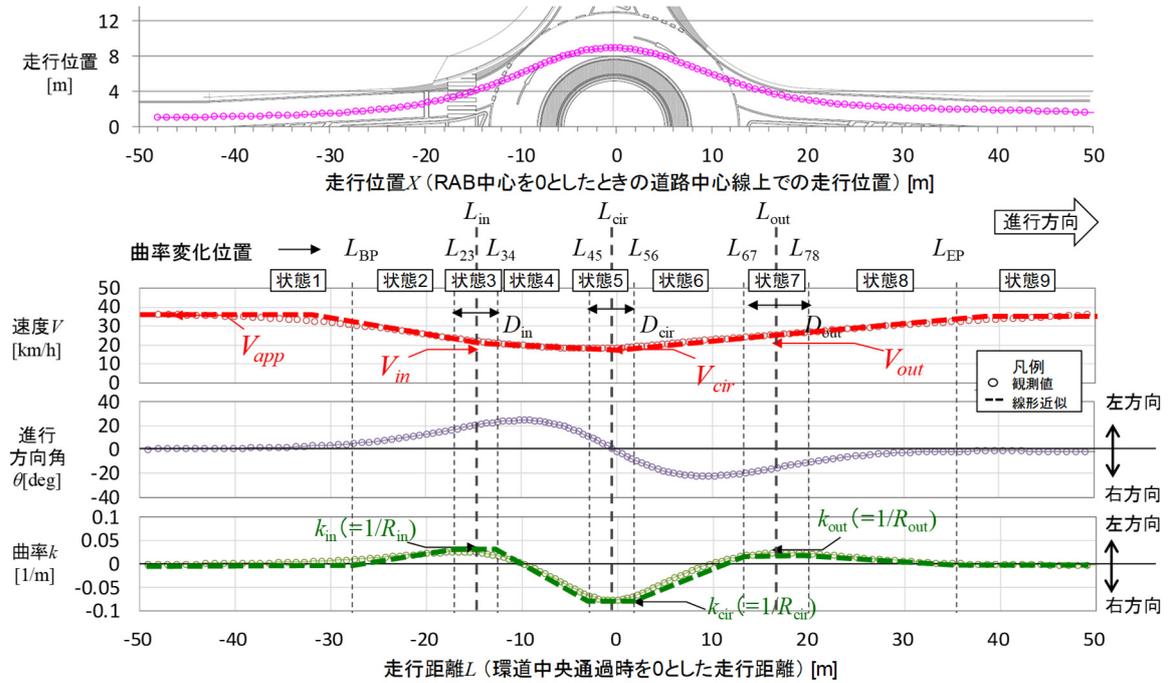


図1 走行挙動プロファイルの例と走行挙動パラメータ

表3 走行軌跡に関するパラメータの推定結果

※()内はt値を表す

幾何構造要素	曲率変化位置パラメータ					曲率パラメータ		
	ステアリング 開始位置 L_{BP}	流入部曲率 最大位置 L_{in}	環道内曲率 最大位置 L_{cir}	流出部曲率 最大位置 L_{out}	ステアリング 終了位置 L_{EP}	流入部 曲率最大値 k_{in}	環道内 曲率最小値 k_{cir}	流出部 曲率最大値 k_{out}
定数項	5.05 (1.04)	-30.72 (-1.49)	-5.46 (-0.91)	-101.84 (-10.4)	32.5 (2.05)	-2.20×10^{-2} (-0.49)	-2.60×10^{-2} (-2.63)	5.71×10^{-2} (1.21)
外径 [m]	-1.89 (-2.99)	-2.70×10^{-1} (-1.97)	—	5.39×10^1 (17.1)	—	2.18×10^{-3} (4.18)	1.80×10^{-3} (2.06)	—
流入部間 交差角度 [deg]	-8.97×10^{-2} (-7.63)	-9.68×10^{-2} (-10.1)	1.10×10^{-2} (2.43)	4.82×10^{-2} (1.86)	5.23×10^{-2} (3.01)	—	-9.23×10^{-4} (-12.7)	9.35×10^{-5} (2.41)
環道幅員[m] (段差無しエプロン含む)	—	8.73 (2.15)	—	14.5 (2.09)	—	—	6.22×10^{-2} (3.33)	—
流入部隅角部 開始位置 [m]	-2.42 (-2.34)	—	—	—	—	—	—	—
流入部幅員 [m]	—	—	—	—	—	—	—	—
流入隅角部 曲線半径 [m]	-1.20 (-2.34)	-6.30×10^{-2} (-2.79)	—	—	—	-1.61×10^{-4} (-6.77)	—	—
流入部分離島長さ [m]	—	—	—	—	—	1.16×10^{-2} (4.19)	—	—
流出部幅員 [m]	—	—	—	—	—	-9.59×10^{-4} (-2.99)	—	—
流出隅角部 曲線半径[m]	—	—	—	-2.60×10^{-1} (-2.71)	—	—	—	-9.07×10^{-3} (-5.70)
流出分離島幅 [m]	—	—	—	—	—	—	—	-7.40×10^{-4} (-1.85)
流出隅角部 開始位置[m]	—	—	—	—	4.57×10^{-2} (3.55)	—	—	—
自由度調整済み R^2	0.73	0.79	0.27	0.49	0.43	0.73	0.86	0.69
サンプル数	30							

した速度プロファイルを仮定する。

図2は、挙動調査により得られた流入部ごとの軌跡の曲線半径の平均値と速度の85パーセント値の関係をプロットし、アメリカの推定モデルと比較したものである。これを見ると、とくに曲線半径が大きい領域においてアメリカの推定モデルに対して乖離が見られる。そこで、本研究での調査結果を用いて、最小二乗法によりアメリカのモデル式のパラメータを改良して得られた以下の式(5)に基づき、速度を推定することとする。

$$V_i = 13.965 \cdot R_i^{0.1839} \quad (5)$$

ここに、 V_i : 予測速度の85パーセント値[km/h], R_i :

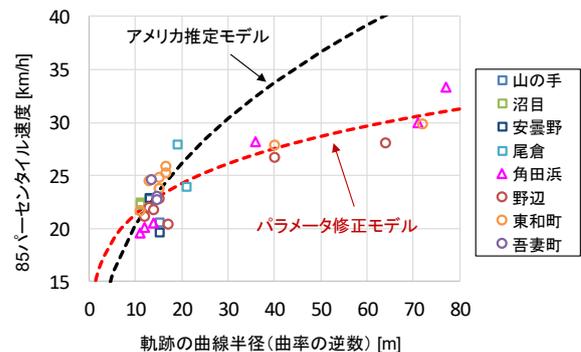


図2 速度推定モデルの検証

軌跡の曲線半径 $(=1/k)[m]$ である。

モデル式の適合度を示す平均二乗誤差(RMSE)は、パラメータ改良前の4.8km/hから改良後は1.8km/hに減少した。

なお、流出入部のアプローチ速度との間には、減速度を $2.0[m/sec^2]$ 、加速度を $1.5[m/sec^2]$ と設定し、同様に直線補間することで速度プロファイルを得ることとする。

5. リスク指標による幾何構造の評価

5.1 リスク指標の算出

4章で得られた走行挙動推定モデルにより、幾何構造条件を与えればラウンドアバウトを通過するときの軌跡および速度が推定されるようになった。ここでは、推定された走行挙動データをもとに、リスク値の要素である見落とし確率と衝突強度を算出することを考える。

(1) 見落とし確率の推定

流入車両が環道車両を見落としこと出合い頭に衝突する事象は、流入車両と環道車両が同時に交錯位置を通過する条件のもと、流入車両が全く回避行動をとらないで流入した場合に発生し得る。ここで、流入車両と環道車両が同じ時刻 $(t=0)$ に交錯位置を通過する状況を考える。衝突時より t 秒前に遡った時刻 t において流入車両が環道車両を見落としている、つまり流入車両が環道車両を視認できない条件は、流入車両から見た環道車両の存在する方向角 θ_{cft} に対して、有効視野角 θ_{fov} が小さい場合であり、すなわち以下の式(6)に示す条件が成り立つ場合である。

$$\theta_{fov} < \theta_{cft}(t) \quad (6)$$

ここに、 θ_{fov} ：流入車両の有効視野角[deg]、 θ_{cft} ：流入車両から見た環道車両の存在する方向角[deg]である。

なお、流入車両は通常は流入する際に安全確認のために視線移動や首振りを行うはずだが、仮にこのような安全確認行動をとらなくとも流入車両が自然に環道車両を認知できる方が視認性の観点からは望ましい幾何構造であると考え、本研究では視線移動や首振りなどの安全確認行動は考えないこととした。

運転時の有効視野角については多くの既往研究において調査されており、高齢者と若年者など運転者によって比較したもの、走行速度や混雑度など交通状況別に比較したものなどがある。そのため有効視野角を一律に決めることは難しく、首振り角度と同様に今後検証が必要であると考えられる。本研究では、既往研究の中においても様々な被験者属性での実験を実施しており、かつ平均的な結果が得られている森島ら⁹⁾の研究成果を参照するものとし、有効視野角は個人差を考慮した正規分布を仮定し、平均値は38deg、標準偏差は10degと設定することとした。以上の仮説より、有効視野角について正規分

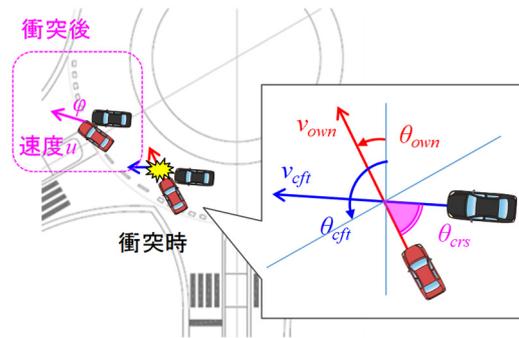


図3 衝突時・衝突後の走行挙動

布を仮定した場合の、ある時刻 t における環道車両を視認できない確率 $P(t)$ は以下の式(7)となる。

$$P(t) = \int_{\theta_{cft}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(\theta_{fov} - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} d\theta \quad (7)$$

ここに、 μ ：有効視野角の平均値 $(=38[deg])$ 、 σ ：有効視野角の標準偏差 $(=10[deg])$ である。

ここまでは、衝突前のある瞬間の時刻について考えたが、実際にはある一定区間(または時間)の中で安全確認を行い、この中で環道車両を認識できれば衝突を回避できる。つまり、最終的に見落としが発生するのは、流入車両が安全確認を開始する時刻 (t_{st}) から衝突に至るまでの限界反応時刻 (t_{re}) の間に、流入車両が環道車両を一度も視認できない状態が続いた場合であると考えられる。従って、ある車両 i の見落とし確率 P_{miss} は、 $P(t)$ の t_{st} から t_{re} までの同時生起確率であり式(8)のように算出される。

$$P_{miss} = \prod_{t_{st}}^{t_{re}} P(t) \quad (8)$$

ここに、 P_{miss} ：見落とし確率、 t_{st} ：流入車両の安全確認の開始時刻[sec]、 t_{re} ：衝突を回避するための限界反応時刻 (t_{re}) $(=0.7[sec])$ である。

安全確認の開始時刻は、環道に流入する手前10mに到達した時間とした。これは、流入部に横断歩道が設置される場合の停止線位置に相当し、他の流入部に対する視認性の確保が必要となる位置である。また限界反応時間は一般的に用いられる0.7secとし、ブレーキが間に合わなくとも何らかの回避行動により出合い頭に衝突することを回避するための限界値と考えた。また、時刻 t の刻み幅(スキャン時間)については、人間の認知、判断プロセスの周期と考えられる0.1秒間隔とした。

(2) 衝突強度の推定

流入車両と環道車両が衝突する際のエネルギー損失量として表す衝突強度は、衝突前後における運動量の保存則および運動エネルギーの保存則から算出する。衝突後の運動状態は両車両の速度と進行方向で合わせて4つの未知数となるが、図3に示すように衝突後は両車両が一体となって動く、つまり完全非弾性衝突を仮定すれば

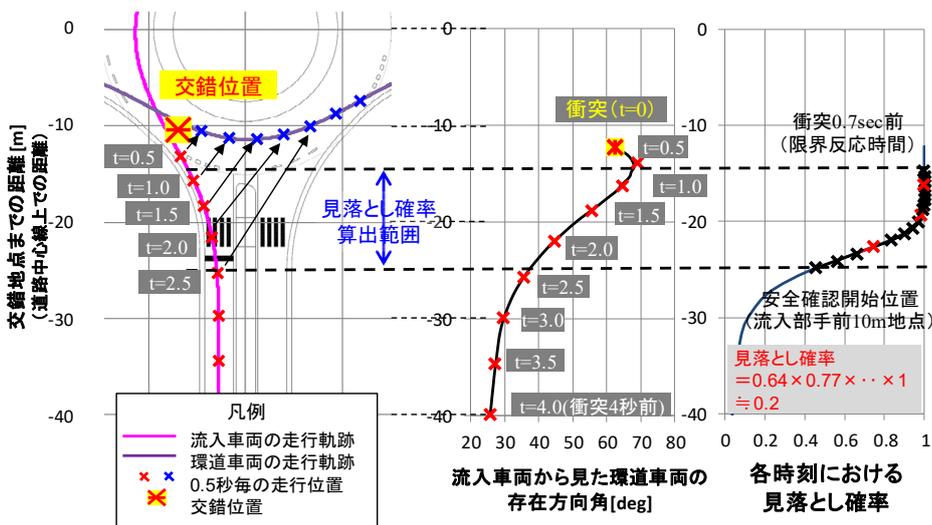


図4 標準的な幾何構造条件における走行挙動と見落とし確率の算出結果

表4 標準的な幾何構造条件

幾何構造要素	構造条件
枝数	4
流出入部間	180
交差角度 [deg]	180
上流隣接角 [deg]	90
下流隣接角 [deg]	90
外径 [m]	30
環道幅員 [m]	5.0
エプロン幅員 [m]	2.0
(段差有無)	(段差あり)
流入部幅員 [m]	3.0
流入隅角部	15
曲線半径 [m]	
分離島長さ [m]	30
分離島幅 [m]	2.0
流出部幅員 [m]	3.0
流出隅角部	15
曲線半径 [m]	

未知数は2つとなり，以下の式(9)の運動エネルギー保存則および式(10),(11)の運動量保存則より，エネルギーの損失分が算出可能となる。

$$\frac{1}{2}m_{own}v_{own}^2 + \frac{1}{2}m_{cft}v_{cft}^2 = \frac{1}{2}(m_{own} + m_{cft})u^2 + \Delta Ke \quad (9)$$

$$m_{own}v_{own}\cos\theta_{own} + m_{cft}v_{cft}\cos\theta_{cft} = (m_{own} + m_{cft})u\cos\varphi \quad (10)$$

$$m_{own}v_{own}\sin\theta_{own} + m_{cft}v_{cft}\sin\theta_{cft} = (m_{own} + m_{cft})u\sin\varphi \quad (11)$$

ここに， m_{own} ：流入車両の車両重量[kg]， m_{cft} ：環道車両の車両重量[kg]， v_{own} ：流入車両の速度[km/h]， v_{cft} ：環道車両の速度[km/h]， u ：衝突後の速度[km/h]， ΔKe ：エネルギーの損失量， θ_{own} ：流入車両の衝突時の進行方向角[deg]， θ_{cft} ：環道車両の衝突時の進行方向角[deg]， φ ：衝突後一体となって動くときの進行方向角[deg]である。

算出されるエネルギーの損失量 ΔKe が衝突強度 I_{crs} に相当するとし，幾何構造の評価を目的とすることから車両重量の影響を除いて単位重量当たりの強度，すなわち $m_{own}=m_{cft}=1$ とする。さらに，進行方向角 θ は道路中心線に対する方向角で定義しているが，交錯時の流入車両の進行方向を基準とした角度で考えると $\theta_{own}=0$ ， $\theta_{cft}=\theta_{crs}$ (交錯角度)と記述でき，最終的に衝突強度 I_{crs} は以下の式(12)として得られる。

$$I_{crs} = \Delta Ke = \frac{1}{4}v_{own}^2 + \frac{1}{4}v_{cft}^2 - \frac{v_{own} \cdot v_{cft} \cdot \cos\theta_{crs}}{2} \quad (12)$$

ここに， θ_{own} ：交錯時の車両間の交錯角度[deg]である。

上式より，衝突強度はそれぞれの流入車両，環道車両の速度の2乗項と，両車両の速度と交錯角度の積からなる項で構成され，速度と交錯角度によって衝突時の強度が異なることを表現したものとなっている。

5.2 標準的な幾何構造におけるリスク指標算出例

図4は，表3に示す正十字の標準的な幾何構造を有する



図5 環道幅員とリスク指標の関係

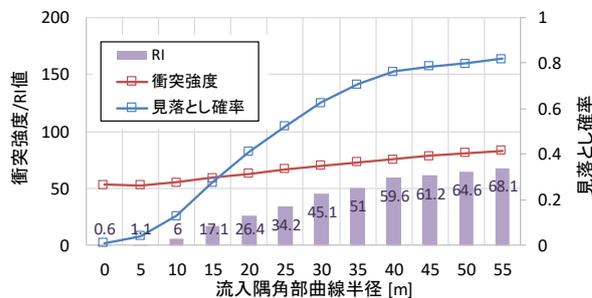


図6 流入隅角部曲線半径とリスク指標の関係

ラウンドアバウトにおいて，走行軌跡の再現結果と交錯位置，さらに衝突に至るまでの環道車両の存在方向角，見落とし確率を推定した例を示したものである。この例によると，交錯位置は流入車両が環道に流入した直後に位置しており，出会い頭事故の状況を再現しているものと考えられる。なお交錯位置が軌跡からずれているのは，車両幅(1.8m)を考慮して交錯位置を算出しているためである。交錯位置から限界反応時間である0.7秒前の地点は，およそ流入部のゆずれ線位置に相当しており，さらに流入部から手前10mの地点はおよそ2.5秒前に相当している。従って，流入部手前のこの区間における環道車両との位置関係が見落とし確率の算出結果に影響することになる。

なお，図4で示した算出結果は，標準的な幾何構造条件

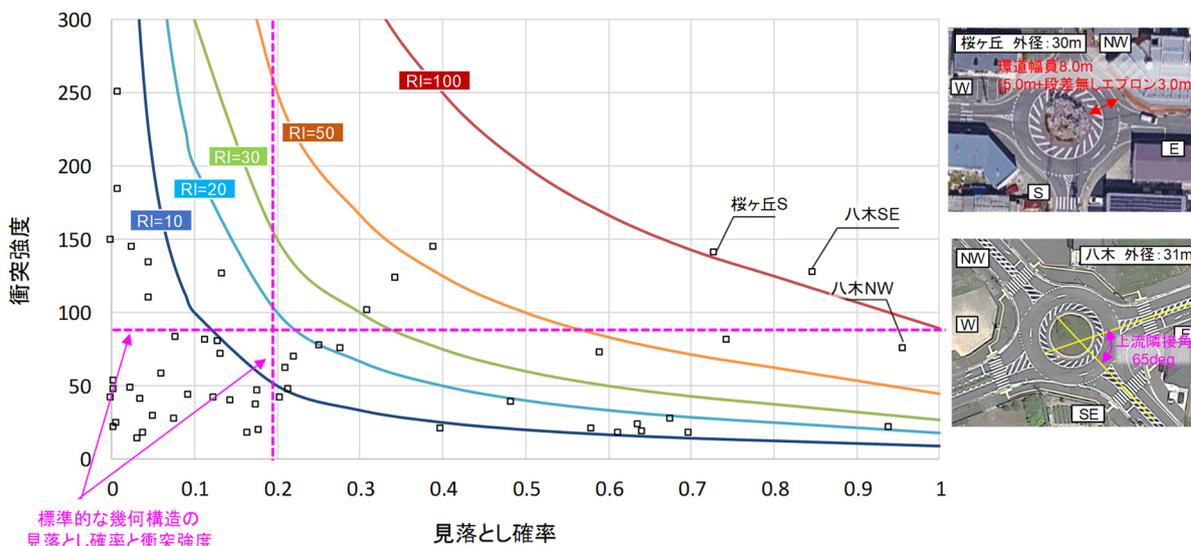


図7 見落とし確率と衝突強度の関係

におけるリスク指標として、この後の分析における比較対象とする。

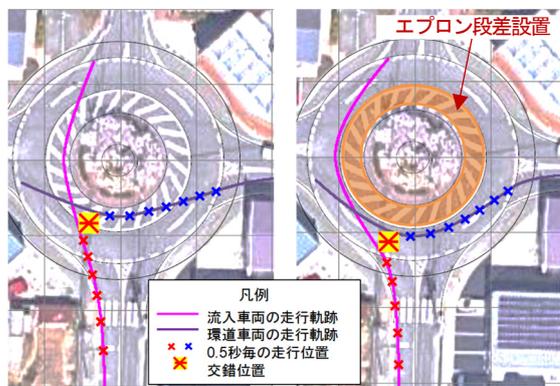
5.3 リスク指標と幾何構造の関係

ラウンドアバウトの各種幾何構造とリスク指標の関係を把握するため、環道幅員(段差無しエプロン部の幅員を含む)および流入隅角部曲線半径を変化させたときのリスク指標への影響について感度分析をする。

図5は、5.2の算出結果に対して、環道幅員のみを変化させたときのリスク指標と見落とし確率および衝突強度を比較したものである。環道幅員が広いほど衝突強度が上昇する傾向にあるが、これは環道幅員が広いほど曲率が小さくなるため速度が上昇することに加え、衝突時の交錯角度も大きくなるため出会い頭に近い状況で衝突が発生するためである。見落とし確率についても、とくに環道幅員が6mより大きい場合に上昇する傾向があり、従って6mを超えるような広い環道幅員は望ましくないことがリスク指標の観点から判断される。

図6は、同様に流入隅角部曲線半径を変化させたときのリスク指標と見落とし確率および衝突強度を比較したものである。見落とし確率に着目すると、流入隅角部曲線半径が大きいほど見落とし確率は高くなる傾向だがその関係性はS字カーブを描いており、とくに流入隅角部の曲線半径が15mから20m程度において感度が大きいことがわかる。一方衝突強度については隅角部曲線半径の影響は小さいため、リスク指標は見落とし確率に依存する結果となる。

なお、外径や隣接流入部間の交差角度などの幾何構造要素との関係についても同様に感度分析をしており、外径が25m以下の場合や隣接流入部との交差角度が70~80deg以下の場合にリスク値が高く算出されることを確認している。



(a) 改良前(現状) (b) 改良(エプロン設置)後

図8 幾何構造改良による軌跡の変化

表5 幾何構造改良前後の評価結果の比較

評価項目	改良前	改良後
見落とし確率	0.73	0.27
衝突強度	140.6	86.6
リスク指標	102.3	23.4

5.4 リスク指標による国内ラウンドアバウトの評価

(1) リスク指標の算出結果

図7は、国内の既存ラウンドアバウト28箇所58流入部の幾何構造に対して、表3のパラメータを用いて推定した走行挙動から見落とし確率と衝突強度を算出し、その結果をプロットしたものである。図中に色別で示されるラインは、リスク指標が10, 20, 30, 50, 100に相当するコンター線であり、グラフの右上ほどリスク指標が高いことを示している。この中でとくに高いリスク指標が算出された桜ヶ丘、八木について、幾何構造の特徴を踏まえてその要因を考察する。

まず桜ヶ丘については、標準形のラウンドアバウトにおける見落とし確率と衝突強度に対していずれも高い水準となっている。これはエプロン段差が設置されておら

ず環道幅員が広い（環道部と段差無しのエプロン部を合わせると8.0m）ため、環道内を直線的に走行することで、交錯角度の大きい出会い頭に近い状況の衝突が起り得るためである。次に、八木のSE流入部については、いずれも衝突強度は標準形のラウンドアバウトと同程度の水準だが、見落とし確率が大きいことが特徴である。これは、上流の隣接流入部との交差角度が小さく（65deg）、安全確認がしにくいためであると考えられる。

このように、エプロン段差がないことや隣接流入部との交差角度が小さいといった幾何構造上の問題があると思われる箇所が、リスク指標の高い箇所として定量的に抽出可能となることが明らかとなった。

(2) リスク指標を用いた幾何構造の改良検討

(1)において、高いリスク指標が算出された桜ヶ丘ラウンドアバウトをケーススタディとして、仮に幾何構造の改良としてエプロン段差を設置した場合のリスク指標の変化について確認する。

図8は、航空写真をベースとした平面図上に、改良前後の幾何構造のイメージと推定される走行軌跡を描画したものである。表5のとおり、現状のリスク指標は100を超える高い水準となっている。そこで、エプロン段差を設置する改良案についてリスク指標を用いて検証した。その結果、エプロン段差を設けることで改良前ではエプロン上を走行していた車両の走行軌跡が、改良後は流入部から環道内にかけて大きく変化している。これにより、衝突時の角度が浅くなり衝突強度が低下するとともに、環道車両に対する安全確認もしやすくなり推定される見落とし確率も低下する。その結果、全体としてリスク指標は標準的な構造のラウンドアバウトと同程度の水準である23.4まで減少することが確認された。

このように、幾何構造の改良検討においてリスク指標を用いることで、改良により期待される効果を定量的に示すことが可能となり、幾何構造設計における安全性能照査のプロセスにおいても活用の可能性があるものと考えられる。

6. まとめ

本研究では、ラウンドアバウト幾何構造の安全性能評価指標としてリスク指標を提案し、その活用可能性を検証した。

得られた成果として、リスク指標の観点から6mを上回る広い環道幅員や15~20mを上回る隅角部曲線半径は不適切であることを明らかにした。また既存ラウンドアバウトの幾何構造の評価から、エプロン段差が設置されていないなど幾何構造の問題を有する箇所を定量的に抽出するとともに、このような箇所に対する対策案の効果を定量的に把握できることを明らかにし、新たな評価指標として活用の可能性があることを示した。

今後の課題としては、リスク指標の算出過程において計算のために様々な仮説や前提条件を設定しているが、これが妥当であるかの検証が必要である。例えば、見落とし確率の算出に関わる首振り角度について本研究では考えないこととしたが、実態を踏まえた検証が必要である。また、中央島高さや隅角部の建築物なども視認性に関わるため、今後このような影響も含めて見落とし確率を推定することも考えられる。

また、本研究で定義した見落とし確率と衝突強度が、それぞれ事故の起きやすさや事故の重度を表したものであり、リスク指標が安全性能を表現するものとして妥当であるかどうか、今後事故データと照らし合わせた検証が必要である。

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。

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) 小林寛・今田勝昭・上野朋弥・高宮進：ラウンドアバウトのエプロン構造の違いによる車両走行特性に関する実験検討，第51回土木計画学研究発表会・講演集，CD-ROM，2015.
- 4) 吉岡慶祐・中村英樹・下川澄雄・森田綽之：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，第55回土木計画学研究発表会・講演集，CD-ROM，2017.
- 5) Alhajyaseen, W., K., M.: The development of conflict Index for the safety assessment of intersections considering crash probability and severity. *Procedia computer science*, Vol. 32, pp.364-371, 2014.
- 6) 吉岡慶祐・中村英樹・下川澄雄・森田綽之：正十字ラウンドアバウトにおける直進車両の走行軌跡に関する分析，第53回土木計画学研究発表会・講演集，CD-ROM，2016.
- 7) Alhajyaseen, W., K., M., Asano, M., Nakamura, H.: Estimation of left-turning vehicle maneuvers for the assessment of pedestrian safety at intersections, *IATSS Research*, Vol.36, pp.66-74, 2012.
- 8) 森島圭祐・水内淳・阿部光一郎・古木翔・山中仁寛・大本浩司：眼球・頭部非固定における自動車運転時の有効視野計測，*日本機械学会論文集(C 編)*，79巻806号，pp.3561-3573, 2013.