

ラウンドアバウトの安全性能評価のための リスク指標の提案

吉岡 慶祐¹・中村 英樹²・下川 澄雄³・森田 綽之⁴

¹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

²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

³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

⁴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

ラウンドアバウトの幾何構造設計は、様々な幾何構造要素の組合せを決定するプロセスであり、単に幾何構造要素の寸法を決定する仕様設計ではなく、幾何構造全体に対して安全性能を評価し、要求される安全性能が確保されない場合は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。

そこで本研究は、海外の安全性能評価方法の我が国への適用性について検証するとともに、我が国のラウンドアバウトの導入状況を踏まえた新たな評価指標としてリスク値を提案し、その有用性を検証した。

その結果、アメリカのFastest PathやスイスのDeflection Angleを用いた評価方法により変形交差点などの不適切な幾何構造を抽出可能であることを示すとともに、これに加えて本研究で提案したリスク値を用いることで、エプロン段差の有無など評価指標のみでは抽出できなかった幾何構造上の問題を有する箇所がさらに抽出可能となることから、新たな評価指標として活用可能性があることを示した。

Key Words: Roundabout, Safety Performance, Geometric design

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軌跡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の見直しを行う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設計を評価する方法を提示しており、これを基に幾何構造設計にフィードバックするといった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、このような幾何構造を評価するための具体的な方法や指標はこれまで検討されていない。我が国のラウンドアバウト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⁾」においても、安全性能評価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。

また、現在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には、従来からロータリーとして存在していたものを区画線や歩車道境界ブロックの設置等の簡易な改良のみを施したものが多く、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の評価を行い、その評価結果に基づいた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、既存の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。

以上の背景を踏まえ、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を確立することを念頭に、海外における安全性能評価方法の我が国への適用性について検証するとともに、我が国のラウンドアバウトの幾何構造特性を踏まえた新たな安全性能代理指標を提案し、その有用性について明らかにすることを目的とするものである。

2. 海外の安全性能評価方法のレビュー

(1) 本研究で考える安全性能評価

海外諸国の設計ガイドラインなどの設計に関する文献や資料については、これまでの筆者らの既往研究²⁾の中で整理しているが、海外では安全性能評価に関して大きく2つの考え方が存在することがわかる。交差点の運用方法を検討するための安全性能評価と幾何構造設計における照査のための安全性能評価である。

前者の交差点の運用方法を検討するための安全性能評価は、ラウンドアバウトの導入可否や車線数・枝数などの運用そのものを検討するための評価である。この評価では、安全性能を事故率や事故件数として捉え、過去の事故データに基づいた事故推定モデルにより、一般的には年間あたりの事故件数を予測することで安全性能が評価される。このような事故率推定モデルは一般的に安全性能関数(Safety Performance Function)と呼ばれており、交差点の運用方法に関する検討のほか、交差点や区間単位で算出される事故件数を基に、ある一定範囲のネットワークや路線全体に対する安全性能を評価するために用いられる。

一方後者の幾何構造設計のための安全性能評価は、ラウンドアバウトの枝数や流入部間の接続角度など基本的な運用条件は決定された中で、幾何構造設計において求められる安全性能が確保されるかどうかを照査するための評価である。本研究で考える安全性能評価とは、このような幾何構造設計における安全性能照査のための評価であり、我が国の導入状況や幾何構造特性を踏まえた安全性能評価方法について検討するものである。

(2) 海外の安全性能評価方法

海外では、ラウンドアバウトの幾何構造設計において求められる安全性能照査型の設計プロセスに対して、ラウンドアバウトの幾何構造設計に関するガイドライン等の中で安全性能の評価方法や評価指標を提示している。各国の評価方法やその考え方の違いについては、筆者らの既往研究において整理しているが、本研究では、このうちアメリカとスイスのガイドラインに示される方法を

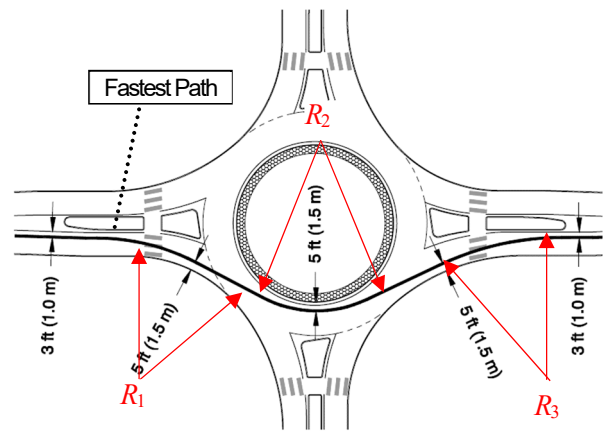


図-1 Fastest Path の例

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

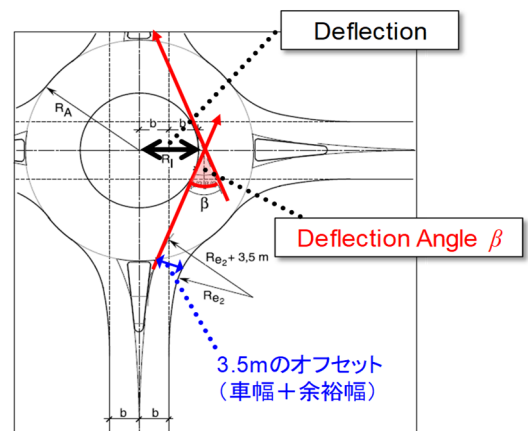


図-2 Deflection Angle の定義

出典：Swiss Standard SN 640 263, Carefours Giratoires を基に一部追記

取り上げ、その考え方について改めて整理するとともに、我が国への適用性について検証する。

a) アメリカ

アメリカ設計ガイドライン³⁾では、幾何構造設計の概略ができた段階で、図-1に示す“Fastest Path”と呼ばれる走行軌跡を図面上から描き、その軌跡の曲線半径(Fastest Path Radius)に応じた走行速度を推定することにより、幾何構造を評価する方法を提示している。その際、Fastest Path Radiusはすべての進行方向に対して描かれ、流入時・環道内・流出時のFastest Path Radius (図-1に示される R_1 ~ R_3)を図面上から読み取り、以下の式(1)から走行速度が推定される。

$$V_i = 8.6164 \cdot R_i^{0.3673} \quad (1)$$

ここに、 V_i : 環道速度の85パーセンタイル値[km/h], R_i : Fastest Path Radius[m]であり、 i は流入時($i=1$)、環道内($i=2$)、流出時($i=3$)のいずれかであることを示す。

この推定式は、アメリカ国内90箇所のラウンドアバウトにおける調査結果⁴⁾において、各調査箇所で見測された速度の85パーセンタイル値と図面上から計測される

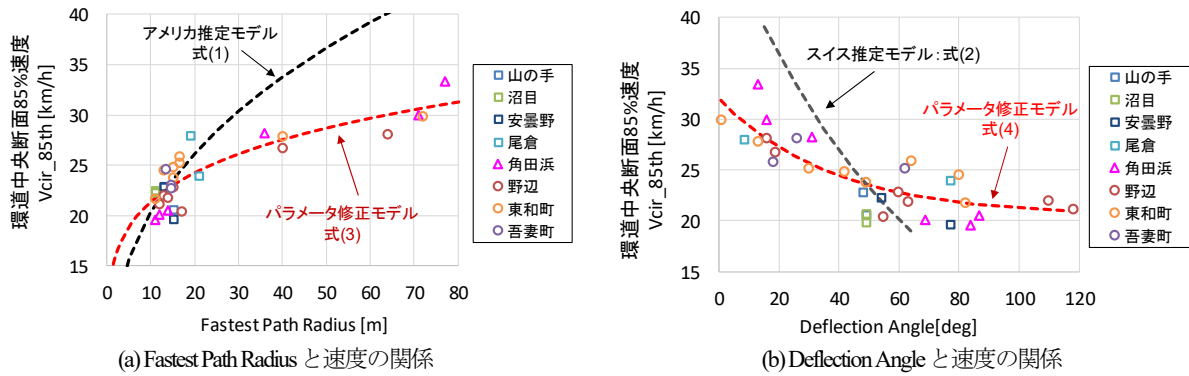


図-3 速度と Fastest Path Radius および Deflection Angle の関係

Fastest Path Radiusの関係から得られたものである。この関係式は、車両が曲線部を走行する際の力学的なつり合い条件に基づくものであるが、実調査で得られたデータから回帰式を得ることで、実務においても使いやすいよう簡単なモデル式にアレンジしている。

なお、直進・右折方向に進行する車両の速度については、流入時・環道内・流出時のFastest Path Radius ($R_1 \sim R_3$)の大小関係を考慮した補正式が実際には用いられている。これは、例えば $R_2 \ll R_1$ となった場合、ここから推定される予測速度も $V_2 \ll V_1$ となるが、現実的な加減速度で速度が変化することを考えれば、流入時・流出時の速度は環道内の速度に依存する場合もあるためである。

b) スイス

スイスの設計ガイドライン⁹⁾では、アメリカのように走行軌跡を描く代わりに、“Deflection Angle” と呼ばれる幾何構造全体を代表する要素を用いて、幾何構造のチェックを行っている。Deflection Angleは、図-2)に示すように、ラウンドアバウト外縁上の流入隅角部および流出隅角部から3.5mのオフセットを取った点から、それぞれ中央島端(エプロンが設置される場合はエプロン端)への接線を引き、これら2接線のなす角として定義される。このDeflection Angleは、外径、環道幅員、流入部の形状などの様々な幾何構造要素の組合せから決定されるため、各種幾何構造の影響を包含した幾何構造の代表要素であると言える。

Spacek⁹⁾は、Deflection Angleと事故の実績データおよび走行挙動との関係について調査しており、式(2)に示されるように、Deflection Angleを説明変数とした走行速度の推定モデルを得ている。

$$V_{85th} = 48.756e^{-0.0148 \cdot \beta} \quad (2)$$

ここに、 V_{85th} : 環道内速度の85パーセンタイル値[km/h], β : Deflection Angle[deg]である。

また、事故率との関係について、Deflection Angleが小さいほど衝突事故の発生率が増加する傾向にあることを示しており、この原因としてDeflection Angleが小さいほ

ど流入車両の速度が高くなること、優先関係を誤りやすくなることを挙げている。このような既往研究の成果を踏まえ、スイスの基準ではDeflection Angleを40deg以上とすることを推奨している。

以上のように、アメリカやスイスのガイドラインに示される幾何構造設計のための安全性能評価においては、安全性能を規定する一つの要素として「速度」を代替的な評価指標と捉え、ある断面での速度の大小や流入部間の速度差などを根拠として幾何構造の評価に活用しようとするものである。

(3) 速度推定モデルの検証

図-3は、国内8箇所¹⁰⁾のラウンドアバウトにおける走行挙動調査により観測された環道内の速度85パーセンタイル値と図面上から計測したFastest Path RadiusおよびDeflection Angleとの関係を進行方向ごとに示し、アメリカ・スイスの速度推定モデル式と比較したものである。

まずアメリカのFastest Path Radiusについて着目すると、Fastest Path Radiusが大きいほど速度が高くなる傾向にあり、ほとんどの箇所¹⁰⁾でFastest Path Radiusは20m以下となっているが、20m以上の箇所の一部は速度が30km/h程度にまで上昇していることがわかる。アメリカの推定式と比較すると、とくにFastest Path Radiusが大きい箇所において、推定式と観測値に乖離が見られるが、これは運転特性の違いやカラー舗装などの速度抑止対策の効果といった平面上の幾何構造以外の要因が考えられる。

我が国の観測結果をもとに、最小二乗法によるパラメータの推定を行ったところ、以下の式(3)が得られた。

$$V_i = 13.965 \cdot R_i^{0.1839} \quad (3)$$

ここに、 V_i : 環道内予測速度の85パーセンタイル値[km/h], R_i : Fastest Path Radius[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。

さらにDeflection Angleに対しては、Deflection Angleが小

さいほど速度が上昇する傾向にあり、さらに一定以上の Deflection Angle が確保されれば、速度は下げ止まりとなる傾向が見られる。そこで、スイスの速度推定モデルをベースに下限値のパラメータを付加したうえで、同様に最小二乗法によるパラメータの推定を行ったところ、以下の式(4)が得られた。

$$V_{85th} = 11.49 \cdot e^{-0.03 \cdot \beta} + 20.46 \quad (4)$$

ここに、 V_{85th} ：環道内予測速度の85パーセンタイル値[km/h]、 β ：Deflection Angle[deg]である。

パラメータ改良後の平均二乗誤差は、改良前は8.0km/hであったものが改良後は2.0km/hとなり推定精度が大きく向上するとともに、Fastest Pathに基づく推定方法と比較しても誤差の程度は遜色ないことが確認された。また、スイスのガイドラインで基準としている40degは改良後の推定モデルにおいても25km/h程度に相当し、これ以下になると速度が大きく上昇する傾向にあることから、40degを一つの基準値として考えることは合理的であると考えられる。

以上を踏まえると、我が国の観測結果に応じたパラメータに改良することで、海外と同様の方法で速度を推定することは可能であると考えられる。

3. 海外の安全性能評価方法の適用性検証

(1) 我が国のラウンドアバウト幾何構造の特徴

2章でレビューしたFastest Path RadiusやDeflection Angleによって推定される速度を根拠として安全性能を評価する方法は、海外とはラウンドアバウトの幾何構造特性が異なる我が国にも適用可能かどうかについて検証が必要であると考えられる。そこで、まずは我が国で環状交差点として運用されている68箇所(平成29年6月時点)の幾何構造の特徴についてGoogleの航空写真を用いて調査した。

表-1は上記の68箇所について、(A)平成25年の道路交通法改正以降に新たにラウンドアバウトとして整備された箇所と、(B)従来より存在していたロータリーを環状交差点として運用している箇所の別に、幾何構造の特徴として、外径が海外と比べて小さい(外径25m未満)箇所数、変形交差点(斜めに交差する流入部が存在)の箇所数、エプロン段差が設置されていない箇所数を示したものである。なおここでの変形交差点とは、T字や十字交差点に対して流入部間の交差角度が90degまたは180degではない流入部を含む交差点を指しており、その目安として流入部間の交差角度が90degまたは180degより±10deg以上ずれている流入部が存在する交差点を変形交差点と定義した。

これを見ると、まず(B)従来からロータリーとして存

表-1 我が国のラウンドアバウトの幾何構造特性

新旧区分	箇所数	外径 25m 未満	変形 交差点	エプロン 段差無し
(A) ラウンドアバウトとして新規で整備された箇所	25	10	8	7
(B) 従来からロータリーとして存在した箇所	43	12	18	41
計	68	22	26	48

在していた箇所については、2箇所を除いたほとんどすべての箇所においてエプロン段差が設置されていないことがわかる。海外ではエプロン段差を設けることが通常であるが、エプロン段差の目的など理解が十分ではないため段差を付けないまま運用されている箇所が多い実態である。また、外径が25m未満と海外のガイドラインにおける外径の最小値(26-27m)よりも明らかに小さい箇所が全体のおよそ3割を占めている。これは、限られた用地制約の中でラウンドアバウトが検討されるケースや住宅地内に存在する乗用車の通行のみを前提としたラウンドアバウトが整備されるケースが比較的多いためである。また、多枝やX型、Y型などの変形交差点において導入されるケースも同程度に存在することがわかる。このような変形交差点においては、概して安全上または円滑上の課題を有している箇所が多く、その代替案として変形交差点に対しても柔軟に対応できるラウンドアバウトが導入または検討されるケースがあるためである。ただし、変形交差点での導入は幾何構造設計によって安全性能や円滑性能がとくに大きく左右されると考えられるため、導入の判断や設計の検討を慎重に行うことが重要であると考えられる。

以上のような、我が国のラウンドアバウトの幾何構造の特徴を踏まえると、海外の評価指標を我が国で適用することを考える上で、以下のような視点が重要である。

- 従来よりロータリーとして運用されていた箇所に対して、エプロン段差の設置などの幾何構造改良の必要性を定量的に示せること。
- 用地制約等により外径を小さくせざるを得ない場合に発生する問題点を評価できること。
- 多枝やX型Y型などの変形交差点において、流入部間の交差角度の影響を評価できること。

これらは、我が国のラウンドアバウトを評価する際に具備すべき事項であると考えられる。本章ではこの点を踏まえたうえで、海外の評価指標の適用性について検証する。

(2) 海外の安全性能評価方法による我が国のラウンドアバウト幾何構造の評価

海外の安全性能評価方法の我が国への適用性を検証するため、Fastest PathとDeflection Angleの観点から我が国の

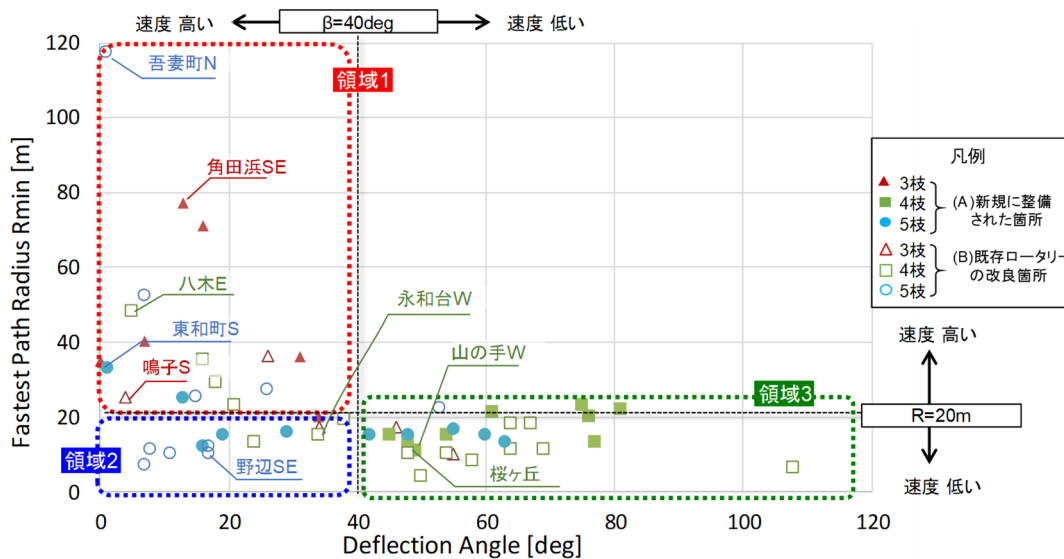


図-4 Fastest Path Radius と Deflection Angle による幾何構造の評価結果

表-2 Fastest Path Radius と Deflection Angle による幾何構造の評価結果の分類

分類	3枝		4枝		5枝	
	(A)新たな整備箇所	(B)従来のロータリー	(A)新たな整備箇所	(B)従来のロータリー	(A)新たな整備箇所	(B)従来のロータリー
領域1 の例			該当なし			
領域2 の例	該当なし	該当なし	該当なし			該当なし
領域3 の例	該当なし	該当なし			該当なし	該当なし

※写真中のアルファベットは流入部名称を示す

ラウンドアバウトの幾何構造を評価する。評価においては、表-1で示した68箇所の環状交差点のうち、外径・枝数・エプロン段差の有無などの幾何構造の諸条件が異なる20箇所のラウンドアバウトの58の進行方向を選定した。対象箇所の枝数は3~5枝、外径は16~44m、環道幅員は4.0~6.5mであり、住宅地内の小規模なものから比較的外径の大きいものまで大小様々となるよう選定している。

図-4は、評価対象の58の進行方向についてFastest Path Radiusの最小値(R_1 ~ R_3 の最小値)とDeflection Angleの関係を枝数別、さらに、(A)新規で整備された箇所、(B)既存ロータリーを改良した箇所の別に示したものである。これに、式(3)と式(4)の速度推定モデルにおいて速度が概ね25km/hに相当する $R=20m$ と $\beta=40deg$ を幾何構造の可否を判断する境界として4つの領域に分類し、それぞれの領域に位置する幾何構造の特徴について詳しく見ることとする。なお表-2は、それぞれの領域に属する代表的な箇所

を枝数別、構造の新旧別に整理したものである。

まず、Fastest Path RadiusとDeflection Angleの両方においてNGと判定される領域1に着目すると、4枝の新規で整備された箇所以外はすべて該当する箇所がある結果となった。これを見ると、斜め方向に進行する流入部が少なくとも1つ以上存在している点が共通している。このような流入部では、エプロンを避けることなく曲線半径の大きい軌跡となり速度が高くなることが想定される。Fastest PathやDeflection Angleによる評価によって、このような速度抑制が得られにくい箇所が抽出できていることが確認された。

次にDeflection AngleのみNGと判定される領域2に着目すると、5枝の野辺や4枝であるが外径が小さく流入部間の交差角度が一定ではない永和台が該当する結果となった。これらの箇所は、領域1と同様に環道内で速度が高くなることが想定される斜め方向に進行する流入部が

Deflection Angle)によって抽出されるが、一方Fastest Pathでは流入部や流出部の幾何構造も考慮するため、ここでの速度抑制を評価できるためである。

最後にFastest Path RadiusとDeflection Angleの両方でOKと判定される領域3について着目すると、4枝で新規に整備された箇所はすべてこの領域に属しており、このような箇所ではFastest Path, Deflection Angle両方の観点から速度抑制が期待できる幾何構造設計であるものと判断できる。しかし、従来のロータリーでエプロンの段差が現在も設置されていない箇所や環道の幅員が広い箇所も一部存在している。

なお、Deflection Angleが40degを超えていれば、Fastest Path Radiusが20mを大きく超過する箇所は存在しない。これは、Deflection Angleが確保されていればFastest Path Radiusも必然的に一定の水準に抑制されることを意味している。

(3) 海外の評価方法の適用性に関する議論

アメリカのFastest Pathや、スイスのDeflection Angleによる評価方法は、個々の幾何構造要素ではなく、様々な幾何構造要素の影響を包含した幾何構造全体に対する評価であり、安全性能を規定する一つの要素である速度を評価の根拠としている点については共通の考え方である。

なお、アメリカのFastest Pathによる評価方法については、図面上からのFastest Pathの描画において複雑で時間を要するため、作業上の負荷が大きいためといった側面もある。これに対してDeflection Angleは、図面上から簡易に計測が可能であり、Fastest Pathと比べて速度の推定精度も遜色ないことが確認された。実務での適用性を考えると、Deflection Angleによる安全性能の評価は有力な方法であると言える。

一方、(1)で述べた我が国のラウンドアバウトにおいて安全性能を評価する際に具備すべき事項に対して、Fastest PathやDeflection Angleではエプロンが設置されていない箇所のすべてを必ずしも抽出できているとは限らないことが確認された。また変形交差点に対しては、流入部間の交差角度が180degより小さい場合に速度が高くなることを評価できているものの、隣接する流出入部との交差角度まで考慮しているものではないため、これによって交錯が生じる危険性まで評価できるものとはなっていない。このような視点の評価についてはさらに議論の余地があるものと考えられる。

4. 本研究で提案する安全性能代理指標

本研究が目指す安全性能代理指標は、ラウンドアバウトの幾何構造設計プロセスにおいて、幾何構造設計の良

し悪しを判断するための評価指標である。ラウンドアバウトの最も重要な利点である重大事故の抑制は、流入部や環道内の幾何構造設計によってその効果は大きく異なることが想定されるし、流入車両と環道車両の出合い頭事故について考えた場合、流入部の形状は安全確認のしやすさや衝突のしかた(衝突時の速度・角度)に大きく影響することが考えられる。幾何構造設計においては、このような衝突につながるような危険事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と考えられる。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はなく、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ということである。これに対し、Fastest PathやDeflection Angle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、その両面を総合的に評価したものではない。

以上を踏まえ、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値を定義し、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が、幾何構造条件と危害の発生確率すなわち事故の発生確率との関係を明らかにすることは、本来は事故データをもとに検討すべきであるが十分な実績データが存在しない現状においては困難である。一方で、幾何構造設計の評価を目的としていることから、幾何構造の影響を表現したものとする必要がある。そこで、流入車両が環道に流入する際の交錯車両を見落とし確率(見落とし確率)を、危害の発生確率に置き換える。

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と捉えたAlhajaseen⁷⁾の方法を用いて、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値は、以下の式(5)として定義する。

$$RI = P_{miss} \times I_{cs} \quad (5)$$

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

リスク値は、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したためである。しかし実際には追突や路外逸脱等の

その他の事故形態も起こり得るが、これはDeflection Angleなどによって推定される速度によってその危険性を評価することが考えられる。

幾何構造条件からリスク値を算出するためには、流入車両と環道車両が衝突する位置を推定し、さらに衝突位置を通過する際の速度とそこ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、幾何構造の各種諸元を説明変数とした走行挙動推定モデルを検討し、リスク値を算出するまでの方法について述べる。

5. リスク指標の算出のためのモデリング

4章で提案したリスク値を推定するためには、幾何構造要素を入力条件とした走行軌跡と速度の推定が必要となる。本章では、ラウンドアバウトを走行する際の走行軌跡および走行速度のプロファイルをいくつかの走行挙動パラメータによって表現し、そのパラメータと幾何構造との関係をモデル化することで、任意の幾何構造条件に対して走行挙動を推定する方法を検討する。

(1) 走行軌跡の再現方法

走行軌跡の再現については、既に筆者らの既往研究⁸⁾により、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される)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⁹⁾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いては曲率の変化が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-5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、曲率の変化は式(6)に示すように9段階で表現され、その際の曲率の変化位置(L_i)や曲率の値(k_i)が走行挙動パラメータとして定義される。

$$k_i(L) = \begin{cases} 0 & L \leq L_{BP} \\ \varphi_2 \cdot L - \varphi_2 \cdot L_{BP} & L_{BP} \leq L \leq L_{23} \\ k_{in} & L_{23} \leq L \leq L_{34} \\ \varphi_4 \cdot L + \frac{L_{34}k_{in} - L_{23}k_{cir}}{L_{34} - L_{23}} & L_{34} \leq L \leq L_{45} \\ k_{cir} & L_{45} \leq L \leq L_{56} \\ \varphi_6 \cdot L + \frac{L_{56}k_{cir} - L_{45}k_{out}}{L_{56} - L_{45}} & L_{56} \leq L \leq L_{67} \\ k_{out} & L_{67} \leq L \leq L_{78} \\ \varphi_8 \cdot L - \varphi_8 \cdot L_{EP} & L_{78} \leq L \leq L_{EP} \\ 0 & L_{EP} \leq L \end{cases} \quad (6)$$

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_{in} 、 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、 φ_2 、 φ_4 、 φ_6 、 φ_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(7)で表される。

$$\varphi_4 = \frac{k_{cir} - k_{in}}{L_{45} - L_{34}} \quad (7)$$

さらに、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、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_{in} とその区間長 D_{in} は、以下の式(8式(9))により算出される。

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

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

ここに、 L_{in} : 流入部最大曲率発生位置[m]、 D_{in} : 流入部の円弧走行区間の長さ[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(6)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。

(2) パラメータの推定結果

(1)の走行軌跡に関するパラメータと幾何構造特性との関係を把握するため、8箇所のラウンドアバウト30の進行方向に対して走行挙動調査を実施し、表-2に示す通り重回帰分析によりパラメータを推定した。

その結果、まず外径や流入部間交差角度は流入から流出まであらゆる曲率変化位置に関するパラメータに対して有意な説明変数であることがわかる。流入部に着目すると、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とから、外径や交差角度が大きいほどステアリングの開始地点がラウンドアバウトから遠いことを意味している。流出部についても同様に、外径や交差角度が大きいほどステアリングの終了地点がラウンドアバウトから遠いことを意味しており、これは迂回量が増えるためである。また、隅角部曲線半径との関係については、流入部、流出部ともに隅角部曲線半径が大きいほど曲率の変化位置が環道から遠いことを意味しており、隅角部の形状に合わせてステアリングを切ろうとする操作が早まるためであると考えられる。

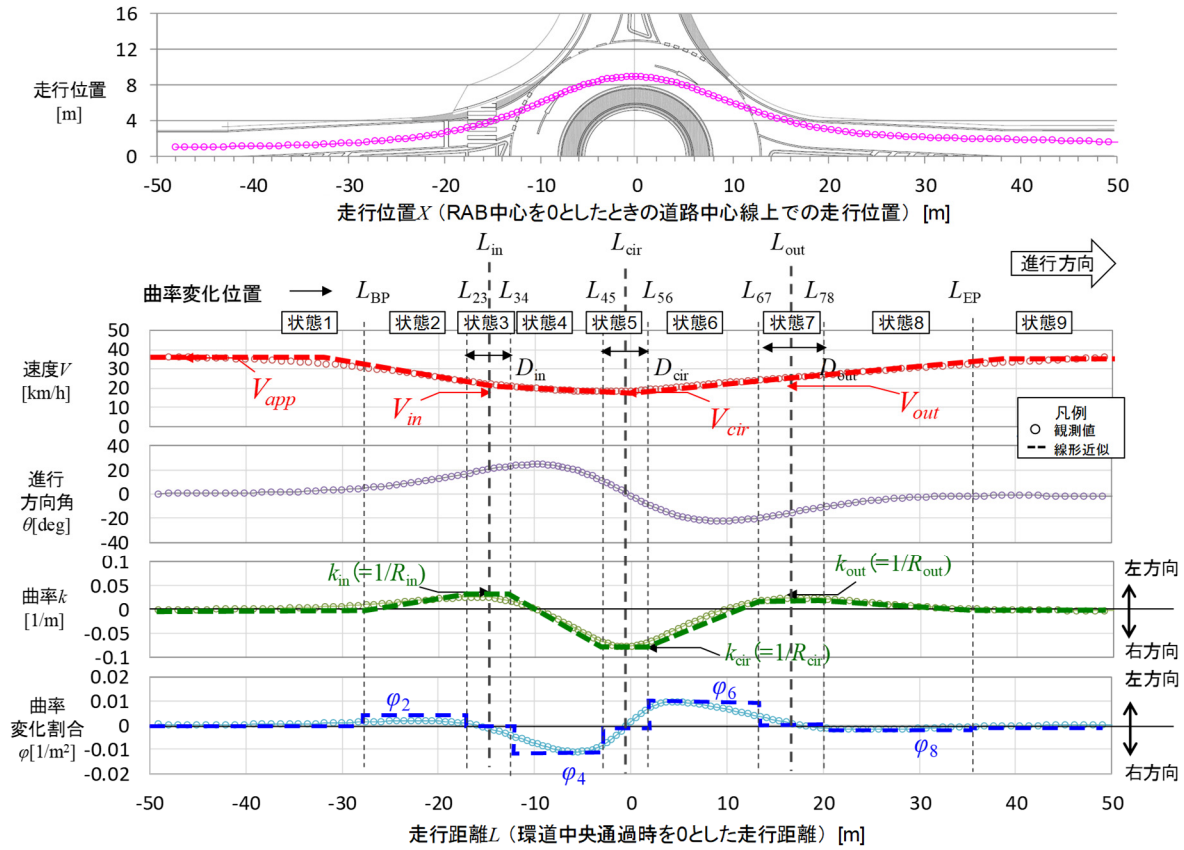


図-5 走行挙動プロファイルの例と走行挙動パラメータ

表-2 走行軌跡に関するパラメータの推定結果

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)	-2.70×10^4 (-1.97)	—	5.39×10^4 (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]	—	8.73 (2.15)	—	14.5 (0.09)	—	—	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 (-0.79)	—	—	—	-1.61×10^4 (-6.77)	—	—	
流入分離島幅 [m]	—	—	—	—	—	—	—	—	
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]	—	—	—	-2.60×10^4 (-2.71)	—	—	—	-9.07×10^3 (-1.85)	
流出分離島幅 [m]	—	—	—	—	—	—	—	-7.40×10^4 (-5.70)	
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								

※()内は t 値を表す

(3) 走行速度の再現方法

走行速度の再現については、例えば信号交差点の右左折速度についてWolfemanら¹⁰⁾は、速度の2回微分量である加加速度(jerk)の変化量が一定であると仮定した3次関数の速度プロファイルを仮定し、そのパラメータを幾何構造条件から得ることで速度プロファイルをモデリングしている。しかし、ラウンドアバウトではS字のステアリングの操作が生じるため、同様の推定方法が可能であるとは言い難い。本研究では、曲率と速度に一定の関係性が見られたことを踏まえ、図-5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(2)で推定された曲率から推定し、この間は等加速度を仮定して便宜的に直線で補間した速度プロファイルを仮定することとした。その際、流出部へのアプローチ速度との間は、減速度を $2.0[m/sec^2]$ 、加速速度を $1.5[m/sec^2]$ 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仮定する。

6. リスク指標を用いた幾何構造の評価

(1) リスク指標の算出

5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。

a) 見落とし確率の推定

リスク値で対象とする流入車両と環道車両が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という条件のもと、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。図-6は、 $t=0$ より t 秒前に遡った時刻 t における流入車両と環道車両の位置関係を表したものである。この時刻 t において流入車両が環道車両を見落とししている、つまり流入車両が環道車両を視認できない条件は、自車両から見た交錯車両の存在する方向角 θ_{cft} に対して、有効視野角 θ_{fov} が小さい場合であると考えられる。すなわち、以下の式(10)に示す条件が成り立つ場合である。

$$\theta_{fov} < \theta_{cft}(t) \quad (10)$$

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の移動や首振りを行うはずであるが、仮にこのような安全確認行動をとらなかったとして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

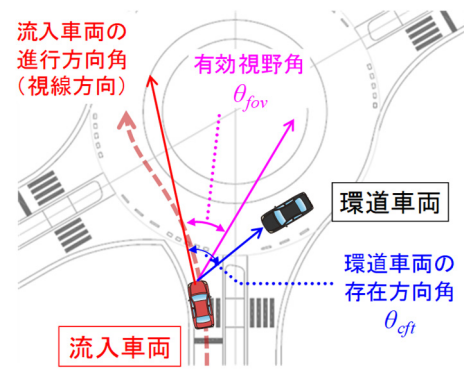


図-6 流入部手前における流入車両と環道車両の関係

しい幾何構造であると考え、本研究では危険側の評価として視線移動や首振りといった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その程度が示されており、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。従って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¹¹⁾の既往研究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たうえで、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布を仮定した場合の、ある時刻 t における交錯車両を視認できない確率 $P(t)$ は以下の式(11)となる。

$$P(t) = \int_{\theta_{cft}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(\theta_{fov} - \mu)^2}{2\sigma^2} \right\} d\theta \quad (11)$$

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回避行動を取ることができる。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。つまり、ある車両 i の見落とし確率は P_{miss} の t_{st} から t_{re} までの $P(t)$ の同時生起確率であり、式(12)のように算出される。

$$P_{miss} = \prod_{t_{st}}^{t_{re}} P(t) \quad (12)$$

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} ：衝突の回避行動に移るまでの限

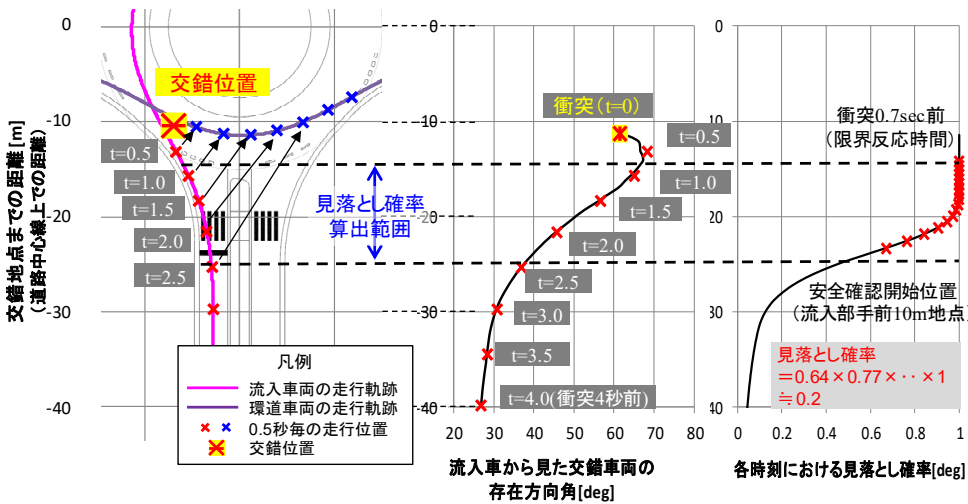


図-8 標準的な幾何構造条件における走行挙動と見落とし確率の算出結果

表-3 標準的な幾何構造条件

幾何構造要素	構造条件
枝数	4
流入入部間 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] (段差有無)	2.0 (段差あり)
流入部幅員 [m]	3.0
流入隅角部 曲線半径 [m]	15
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 曲線半径 [m]	15

界反応時刻(t_{cr})($=0.7[\text{sec}]$)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、横断歩道が設置される場合の停止線位置に相当し、他の流入部に対して視認性が確保される位置となる。また限界反応時間は既往研究を参考に0.7secとし、ブレーキが間に合わなくて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。

b) 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で表される衝突強度は、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。図-7に示すように、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、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未知数は2つとなり、以下の式(13)の運動エネルギー保存則および式(14),(15)の運動量の保存則より、エネルギーの損失分が算出可能となる。

$$\frac{1}{2} m_{own} v_{own}^2 + \frac{1}{2} m_{cft} v_{cft}^2 = \frac{1}{2} (m_{own} + m_{cft}) u^2 + \Delta K_e \quad (13)$$

$$m_{own} v_{own} \cos \theta_{own} + m_{cft} v_{cft} \cos \theta_{cft} = (m_{own} + m_{cft}) u \cos \varphi \quad (14)$$

$$m_{own} v_{own} \sin \theta_{own} + m_{cft} v_{cft} \sin \theta_{cft} = (m_{own} + m_{cft}) u \sin \varphi \quad (15)$$

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], ΔK_e : 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 ΔK_e が衝突強度 I_{crs} に相

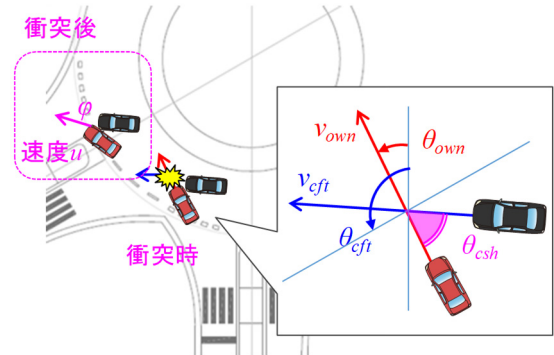


図-7 衝突強度算出時の状況

当するとし、さらに幾何構造の評価を目的としていることから車両重量の影響を除去するために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、最終的に求める衝突強度はスカラー量であるため任意の方向角で考えることができる。そこで、交錯時の車両の進行方向を基準とした角度で考えると $\theta_{own}=0$, $\theta_{cft}=\theta_{crs}$ であるため、以下の式(16)のように記述できる。

$$I_{crs} = \Delta K_e = \frac{1}{4} v_{own}^2 + \frac{1}{4} v_{cft}^2 - \frac{v_{own} \cdot v_{cft} \cdot \cos \theta_{crs}}{2} \quad (16)$$

上式より、衝突強度はそれぞれの流入車両、交錯車両の速度の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。

(2) 標準的な幾何構造におけるリスク指標の算出結果

図-8は、表-3に示す正十字の標準的な幾何構造を有するラウンドアバウトにおいて、走行軌跡の再現結果と衝突前における交錯車両の存在方向角、見落とし確率を推定したものである。

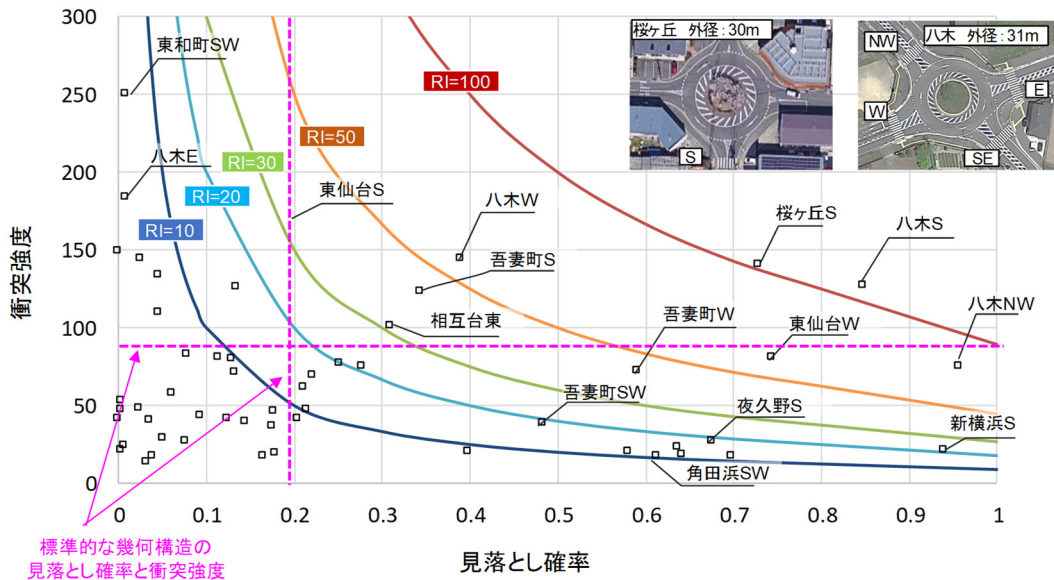


図-9 見落とし確率と衝突強度の関係

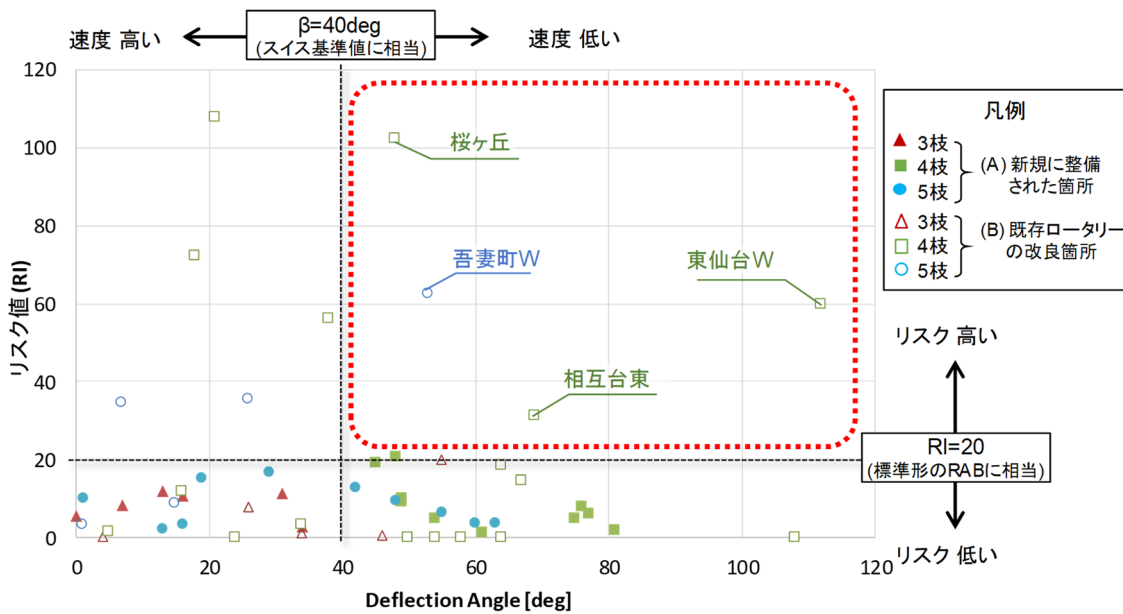


図-10 リスク値と Deflection Angle の関係

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、出合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、ここで示した算出結果は、標準的な幾何構造条件におけるリスク値としてこの後の分析における比較対象とする。

(3) リスク指標による幾何構造の評価

(a) 見落とし確率と衝突強度

図-9は、3章において海外の安全性能評価方法を検証した28箇所58流入部の幾何構造に対して、表-2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、リスク値が10, 20, 30, 50, 100に相当するコンター線を示している。リスク値は見落とし確率と衝突強度の積であるため、グラフ中の右上ほどリスク値は高く、左下ほどリスク値は小さいことになる。これを見ると、いくつかの箇所において高いリスク値が算出される結果となった。とくに高いリスク値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、環道内をショートカットするように走行することで、視認性が低下するとともに、交差角度の大きい出会い頭に近い状況の衝突が起こり得るためである。次に、八木のNW流入部やS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、安全確認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値の高い箇所として抽出されることが確認された。

(b) リスク値とDeflection Angleの関係

図-10はリスク値とDeflection Angleの関係について見たものである。このうちDeflection Angleが40deg以上かつリスク値が20以上の箇所は、リスク値を用いることで新たに抽出される箇所となる。なおリスク値20は、正十字で外径30mの標準的な幾何構造におけるリスク値が20程度であったことから、一つの目安として設定した値である。

その結果、前述の桜ヶ丘に加えて、相互台東や東仙台、吾妻町といった既存ロータリーを改良してラウンドアバウトとして運用している箇所が抽出された。これらの箇所はいずれも環道内のエプロンに段差が設置されていないまたはエプロンそのものが無く環道幅員が広いこと、東仙台(D=18m)や相互台東(D=25m)のように外径が小さいといった問題点が共通している。従って、3章で指摘した我が国のラウンドアバウトにおいて安全性能を評価する際に具備すべき事項に対して、リスク値を用いることで適切な評価が可能となったものと言える。

(4) リスク値を用いた幾何構造の改良検討

前節の評価において、リスク値によって新たに抽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値の変化について確認する。

図-11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-4のとおり、現状ではDeflection Angleはスイスの基準値である40deg以上を満たしているものの、リスク値は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値を用いて検証した。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、とくに流入直後から環道内にかけて大きく変化している。

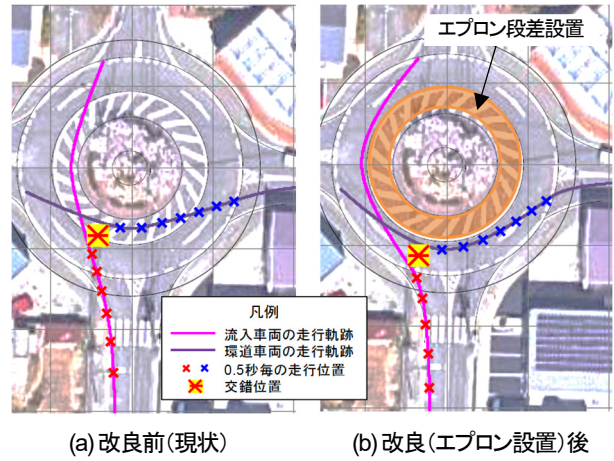


図-11 幾何構造改良による軌跡の変化

表-4 幾何構造軽量前後の評価結果の比較

評価項目	改良前	改良後
Deflection Angle	57deg	89deg
見落とし確率	0.73	0.27
衝突強度	140.6	86.6
リスク値	102.3	23.4

これにより、衝突時の角度が浅くなることで衝突強度が低下していることがわかる。また、環道車両の走行位置が変化したことで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している。その結果、全体としてリスク値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値を用いることで、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幾何構造の見直しのプロセスにおいても活用の可能性が考えられる。

7. まとめ

本研究は、我が国のラウンドアバウト幾何構造に対する安全性能評価方法を確立することを念頭に、海外の評価方法の我が国への適用性について検証するとともに、我が国のラウンドアバウトの導入状況を踏まえた新たな評価指標としてリスク値を提案し、安全性能代理指標としての有用性を検証した。

本研究で得られた成果として、アメリカのFastest PathやスイスのDeflection Angleを用いた幾何構造の評価により、流入部間の交差角度が異なる変形交差点をはじめとした不適切と考えられる幾何構造を抽出可能であることを示された。これに加えて、本研究で提案した新たな評価指標であるリスク値を用いることで、エプロン段差が

設置されていないなど海外の評価指標では抽出できなかった幾何構造上の問題を有する箇所が抽出可能となることが確認された。また、このような箇所に対する対策案の効果を定量的に評価できることを明らかにし、既存のラウンドアバウトに対する評価や改良の検討において、新たな評価指標として活用の可能性があることが示された。

今後の課題として、以下の事項が挙げられる。

リスク値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。具体的には、見落とし確率の算出に関わる首振り角度について考慮していないことや算出区間範囲を流入部手前10mから限界反応時間である衝突の0.7秒までと仮定していることについて、実態の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大性を表したものであり、リスク値が安全性能を表現するものとして妥当であるかどうか、今後ラウンドアバウトの事故に関するデータが蓄積されていく中で検証が必要である。

さらに実務設計での活用という観点において、幾何構造要素を入力条件としたリスク値推定モデルを構築し、実務上使いやすいものにする必要がある。

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) 吉岡慶祐・中村英樹・下川澄雄・森田緯之：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.
- 3) Transportation Research Board: NCHRP Report 672 Roundabouts: An Informational Guide, Second Edition, 2010.
- 4) Transportation Research Board: NCHRP Report 572 Roundabouts in the United States, 2007.
- 5) Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS): Swiss Standard SN 640 263, Carrefours Giratoires, 1999.
- 6) Spacek, P.: Basis of the Swiss Design Standard for Roundabout, Transportation Research Record, No.1881, pp.27-35, 2004.
- 7) Alhajyaseen, W., K., M.: The Development of Conflict Index for the Safety Assessment of Intersections Considering Crash Probability and Severity. Procedia Computer Science, Volume 32, pp.364-371, 2014.
- 8) 吉岡慶祐・中村英樹・下川澄雄・森田緯之：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.
- 9) 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.
- 10) Wolferman, A., Alhajyaseen, W., K., M. : Modeling Speed Profiles of Turning Vehicles at Signalized Intersections, 3rd International Conference on Road Safety and Simulation, 2011.
- 11) 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.

(2018.4.27 受付)

PROPOSAL OF RISK INDEX FOR THE SAFETY PERFORMANCE EVALUATION OF ROUNDABOUT GEOMETRIC DESIGN

Keisuke YOSHIOKA, Hideki NAKAMURA, Sumio SHIMOKAWA
and Hirohisa MORITA