

ドライビングシミュレータを用いたラウンドアバウトの幾何構造の影響に関する研究

藤井 陽大¹・康 楠²・寺部 慎太郎³・川口 正⁴・桐戸 健太郎⁵・奥田 進⁶・
柳沼 秀樹⁷・田中 皓介⁸

¹非会員 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻卒 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)
E-mail:7616627@gmail.com

²正会員 東京理科大学嘱託助教 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)
E-mail:kangnan@rs.tus.ac.jp

³正会員 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)
E-mail:terabe@rs.noda.tus.ac.jp

⁴正会員 (株)東京建設コンサルタント 中部支社 (〒460-0003 名古屋市中区錦2-5-5)
E-mail:kawaguchi-t@tokencon.co.jp

⁵非会員 (株)東京建設コンサルタント 中部支社 (〒460-0003 名古屋市中区錦2-5-5)
E-mail:kirito-k@tokencon.co.jp

⁶正会員 (株)東京建設コンサルタント 中部支社 (〒460-0003 名古屋市中区錦2-5-5)
E-mail:okuda-s@tokencon.co.jp

⁷正会員 東京理科大学講師 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)
E-mail:yaginuma@rs.tus.ac.jp

⁸正会員 東京理科大学嘱託助教 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)
E-mail:tanaka.k@rs.tus.ac.jp

近年、安全かつ災害時にも運用できる、円形交差点であるラウンドアバウト(以下RAB)の導入が日本で進んでいる。しかし、RABの車両挙動は幾何構造の影響を強く受けるが、日本ではこの知見がまだ少ない。本研究では、5つの異なる幾何構造のRABを作成し、ドライビングシミュレータ(以下DS)による実験を行い、幾何構造の影響による走行挙動の差について検討した。結果、隅角部半径による影響が強く、隅角部半径が大きいほど流入する際の速度が速くなり、流入位置もRAB中心から遠くなることを確認できた。本研究から、DSはRABの幾何構造の検討に用いることの有効性が確認でき、今後はより多くの条件下でのDS実験が必要であると考えられる。

Key Words : roundabout, geometric structure, speed, driving simulator

1. はじめに

平成 26 年度の道路交通法の改正に伴い、我が国ではラウンドアバウト(以下 RAB)と呼ばれる円形交差点が導入され始めている。

RAB では車両挙動は幾何構造に大きく依存される。しかし、我が国では特有の事情(左側通行や国土の狭さ)もあり、海外の知見をそのまま適用できない現状である。RAB における幾何構造と車両挙動の関係として、「ラウンドアバウトマニュアル」¹⁾では、下記の事項が示されている。

- ・1 回のハンドル操作で曲がれるような流入部、流出部の隅角部半径と RAB の外径の大きさの場合は、速度上昇を招く恐れがある。
- ・外径と中央島直径の関係として、中央島が小さい場合、直進車両が直進的に走行し速度が高くなる。
- ・RAB は外径・流出入口・環道幅員・中央島直径などの設計がお互いに密接に関連している。

また、「ラウンドアバウトの社会実装と普及促進に関する研究」²⁾では、社会実験により中央島直径を大小で変えた検証を行い、不適切な中央島直径では走行速度

が高くなる傾向が見られた。

しかし、これらの RAB の社会実験はそれぞれの沿道環境や土地の制約により、純粋な幾何構造の影響把握とは言い難い。そこで本研究では、比較的安価で容易に様々な条件下で実験が出来るドライビングシミュレータ(以下 DS)を用い、5つの異なる幾何構造の RAB に対する走行実験を行った。この DS 実験により、RAB の幾何構造の影響を定量的に把握し、日本における幾何構造の知見集積と今後の RAB 設計におけるより安全性の高い指標作りを目的に研究を行っていく。

2. 既往研究

①ラウンドアバウトの幾何構造に関する研究

(1)中村らは、RAB の示方書として「ラウンドアバウトマニュアル」¹⁾を作成している。マニュアルは、我が国で積極的に導入されはじめている RAB に対し必要となる、計画と設計、およびその運用に関わる基本的な考え方を示すとともに、設計に関わる技術的基本事項について取りまとめたものである。マニュアルには RAB の定義や種類、RAB の適用条件、幾何構造設計、道路標識などによる交通運用などが網羅されており、本研究でもこれらの指標を参考にしている。

しかし、隅角部半径や中央島直径など明確な記載がなされていない幾何構造もある。そのため、本研究では、隅角部半径、中央島直径に着目した実験を行った。

(2)中村らは、RAB の社会実験の報告書として「ラウンドアバウトの社会実装と普及促進に関する研究 (I) ~ (III)」²⁾を作成している。特に (III) では、実際の社会実験の事例が記載されている。それぞれの事例で、RAB 化するに至った経緯と、社会実験において RAB 化する際に留意した点や結果・考察、実装する場合により改良した点などがまとめられている。

しかし社会実験では周辺の沿道環境なども車両挙動に影響してしまい、幾何構造の純粋な影響を把握し辛い。そのため本研究では DS を使用し、沿道環境を一定とした走行実験を行った。

(3)小林ら³⁾は、RAB の知見蓄積を目的に諸外国における技術基準での設計の考え方について比較及び整理を行っている。また、我が国の設計車両と通行方法を踏まえた試設計や、実車両を用いた走行実験を行い、幾何構造の最も基本的な要素である外径、中央島直径、環道幅員の決定に当たっての目安や留意点、標準値などについて検討している。

しかし、実車両を用いるような大規模実験では試す幾何構造の種類に限界も見られた。小林らが検討して

いない幾何構造について実験が必要と考えられる。

(4)吉岡⁴⁾らより、正十字の RAB を対象とした映像解析で環道内での走行速度はおおよそ 20[km/h]前後となっており、中央島の横を通過した後は、流出部に向かって速度を上げながら走行している傾向が見られたが、流入部では速度のバラつきが大きかった。また、中央島横を走行する位置と走行軌跡の曲率半径に相関があり、その結果、環道走行時の速度に影響を与えていることが確認された。

この結果より、本研究では特に流入部に着目した解析を行う必要があると考えた。

②ドライビングシミュレータに関する研究

大島ら⁵⁾は、増加するであろう DS の役割について関係機関へのヒアリングや文献調査により、DS の活用ニーズや課題などをまとめている。

特に、DS の利用価値として「DS でしか評価できないシナリオ」があり、実車実験では難しい複雑な条件設定や繰り返し同条件で実験を行いたい場合の再現性、天候などを DS では容易に統制できる。また、実車では実験不可能な危険事象に対する技術評価においても有用である。

DS が抱える課題として、「評価方法の標準化」、「シミュレータの実環境再現性とシミュレータ酔い」、「シナリオ作成、カスタマイズ等に掛かる負担」の3点が挙げられている。これらの課題点に留意し本研究では実験をしている。

③車両の走行速度と安全性に関する研究

WHO⁶⁾ speed management: a road safety manual for decision-makers and practitioners は、自動車と歩行者交通事故致死率との関係を速度別で表している。結果によると、自動車の速度が 50[km/h]以上で歩行者と衝突した場合、致死率は 80[%]以上となっている。一方、自動車の速度が 30[km/h]以下で歩行者と衝突した場合の致死率は 10[%]以下となっている。

そのため、本研究では、速度を安全性指標として、データの解析を行い、安全性について考察していく。

3. 実験概要

①RABの幾何構造

本研究で検証された RAB 幾何構造を、図-1 に示す。5 つ RAB における幾何構造の値は表-1 に表示する。本研究では、5 つの RAB 全てにおいて外径を 27.0[m]、環道幅員を 5.0[m]、分離島あり、横断歩道なしとしている。ここ

で、「標準」は示方書である「ラウンドアバウトマニュアル」¹⁾から正十字型での望ましい設計値を参考にし、設定した。本研究では、外径は27.0[m]、環道幅員は5.0[m]で固定しているため中央島直径を変化させた場合、同時にエプロン幅員も調整の意味合いで変化している。隅角部半径と中央島直径に着目した理由として、「ラウンドアバウトマニュアル」¹⁾に明確な隅角部半径、中央島直径の数値が記載されていないため、これらの幾何構造の影響を検討するためである。したがって、本研究では隅角部半径を「標準」：8.75[m]、「隅角部大」：15.0[m]、「隅角部小」：4.0[m]とし、中央島直径を「標準」：12.0[m]、「中央島小」：10.0[m]、「中央島大」：14.0[m]と設定した。

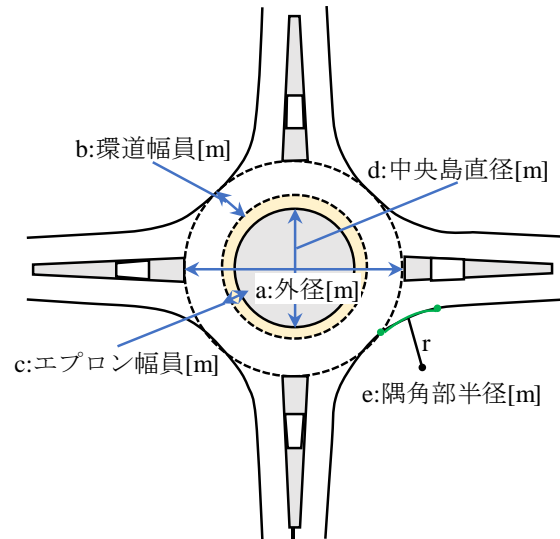


図-1 RAB 幾何構造名称

表-1 RAB 構造の値

| RAB構造 | a | b | c | d | e |
|-------|------|-----|-----|------|------|
| 標準 | 27.0 | 5.0 | 1.5 | 12.0 | 8.75 |
| 隅角部大 | | | 1.5 | 12.0 | 15.0 |
| 隅角部小 | | | 1.5 | 12.0 | 4.0 |
| 中央島小 | | | 2.5 | 10.0 | 8.75 |
| 中央島大 | | | 0.5 | 14.0 | 8.75 |

②本実験で使用したDS

本実験で使用したDSを図-2に示す。本実験で使用したDSは「東京建設コンサルタント」が所有するFORUM 8製「Compact Research シミュレータ」を使用した。このDSの特徴として、モーションなし（車両の傾きなどが再現されない）、液晶モニタが3面、座席やハンドル周りが実車に近い作りとなっており、ウィンカーやアクセルペダル、ブレーキペダル、サイドブレーキ、シフトレバーが再現されている。またドライビングシミュレータソフトはFORUM 8製「UC-win/Road ドライブ・シミュレータ」を使用した。

③被験者

本実験に参加して頂いた20名の被験者の年代、男女比、運転頻度の情報を図-3に示す。グラフより、40代が最も多く、男女比は15：5であった。そして、運転頻度については多くの人が週1回程度は運転していた。また、アンケートより、20名のうちRABの走行経験がある人は10人であった。

④実験コース

DS実験で走行したコースについては、図-4に示されたように、幾何構造の異なる5つのRABを直線状に並べ、各RAB間は200[m]確保している。被験者にはRABをそれぞれ直進してもらうように指示を出している。このRABの繋げ方は5パターン用意し、被験者によってランダムにパターンを選択している。

⑤実験手順

本研究のDS実験手順は、まず被験者にRABの走行方法



図-2 実験で使用したDS

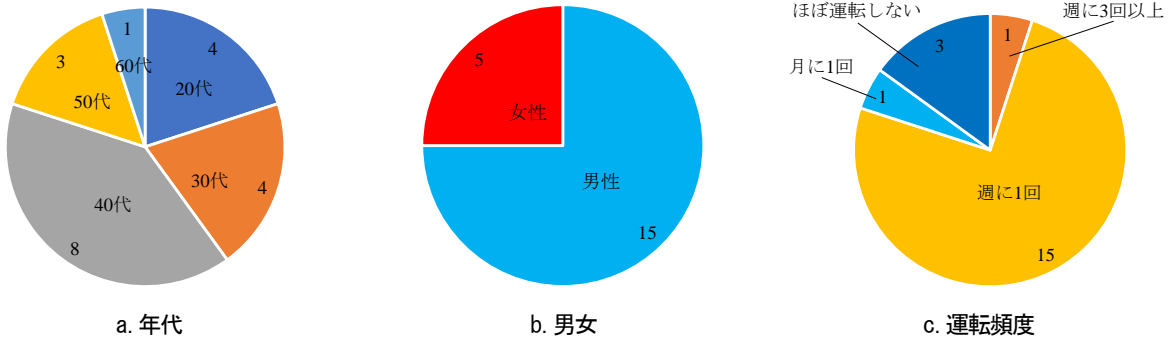


図-3 被験者の属性

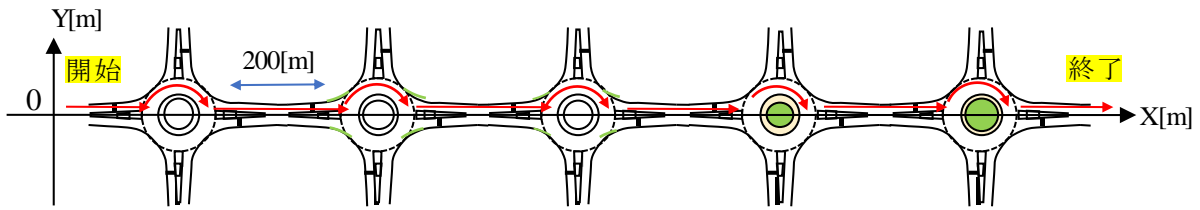


図-4 実験コース

について説明し、その後DSに慣れてもらうための試運転を5分間行った。試運転が終わった後、本実験の1回目を行い、休憩時間を取り、本実験の2回目を行い、最後にアンケートに回答を行い終了である。

⑥その他の条件

本実験では幾何構造の純粋な影響を把握したいため、他車両や歩行者による減速や一時停止などが発生しないようにする必要がある。そこで、実験中は他車両や歩行者のいない状況にし、自車両のみの自由流走行状態としている。同様に沿道環境が走行挙動に影響を及ぼす恐れがあるため、周りに何も無い平原にRABを作成した。しかし、速度感を持たせるため一定間隔に木を植えている。実際の実験画面を図-5に示す。



図-5 実験の画面

また、実験は「小型自動車」で走行している。

アンケートには年齢、運転頻度、RAB走行経験の有無などの基本情報の他に、本実験で「RABの構造に差があったことが分かったか？」という質問をし、自由回答として意見を書いてもらう形式をとった。なお本実験の意図である、RABの幾何構造については被験者に説明していない状態で行った。

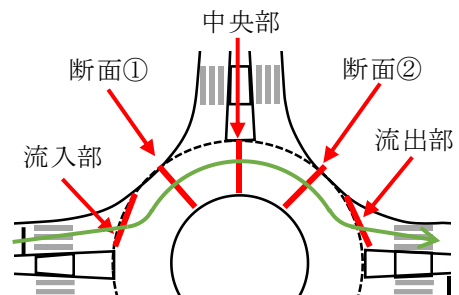


図-6 断面の定義

4. 結果・考察

①DSの信頼性の検討

DS実験による走行挙動と実在のRABでの走行挙動がどの程度違うのかを確かめるために、走行速度を比較し

た。DS実験からは「標準」のデータを用い、実在のRABではこの「標準」と比較的近い幾何構造のRABである「焼津RAB」の走行挙動データを用いた。焼津RABの幾何構造は外径：27.0[m]、環道幅員：5.0[m]、エプロン幅員：2.0[m]、中央島直径：11.0[m]となっている。速度を分析するため、図-6に示すように、5つの断面を定義する。これらDSと観測された焼津RABを断面速度での速度挙動として比べた結果を図-7に示す。20名実験者が2回走行す

るため、サンプル数は40になる。グラフより、それぞれの断面においてDSと焼津RABのデータでT検定を行った。その結果、中央部断面以外、5%有意な差が得られた。考えられる原因として、1つ目に焼津RABではドライバーはRABに慣れている周辺住民が多いため速度が速く出ているのに対し、DS実験では被験者の半数がRAB未経験であった。そのため慎重に運転し速度が遅くなったと考えられる。2つ目として、DSの「標準」と焼津RABでは幾何構造が中央島直径:1.0[m]の差があり、そのため、速度に影響したと考えられる。

以上の条件の違いを考慮した上で、DS実験の結果は概ね速度挙動が再現出来ているため、DSの結果は信頼出来ると考えられる。

②幾何構造の影響把握

DS実験から得られた5つのRABの走行挙動データをRABの幾何構造の影響という観点から分析する。

(1)速度比較

5つのRABにおける断面平均速度の比較は図-8に示す。

隅角部半径については、「隅角部大」が全体的に早い速度での走行が見られた。また、「隅角部大」と「隅角部小」でT検定を行った。差が5%有意のため、「流入部」断面で有意傾向があるという結果となった。これは、隅角部半径が大きいほど、曲がり易くなるため速度が早い傾向があると考えられる。

中央島直径については大きな差は得られず、「中央島小」と「中央島大」におけるT検定を行い、すべての断面が5%有意な差を得られなかった。これは、本実験で環道幅員を固定していることが原因と考えられる。中央島直径によって、エプロン幅員が変わったが、DSでエプロンの段差を実現できないので、実験者に影響を与えず、中央島直径に及ぼす影響も得られなかったと考えられる。

(2)走行位置比較

同じように5つのRABを断面での平均のY座標で比較したものを断面走行位置として図-9に示す。Y座標の原点0は、図-6に示したように、RAB中央島の中心で定義されている。

隅角部半径に関する結果については、「隅角部大」と「隅角部小」についてのT検定を行った結果、流入部と流出部断面で5%有意な差が得られた。そのため、流入部と流出部の走行位置は隅角部半径に及ぼす影響が大きい傾向が見られた。速度比較と同様に、隅角部半径は流入部、流出部の隅切りに関係のある幾何構造のため差が出ている。そして、DS実験において隅角部半径を4.0[m]、8.75[m]、15.0[m]と変化させると差が現れることが判明したことは、DSでRABの幾何構造の影響を把握する有効な手段で

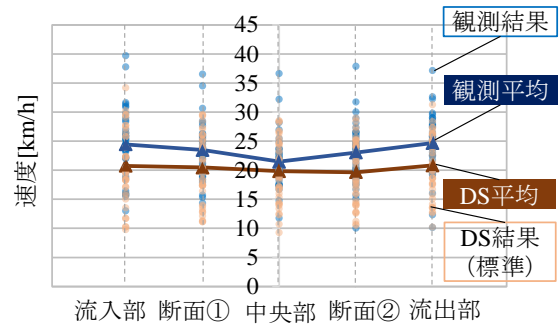


図-7 「標準」と实在(焼津RAB)の断面速度

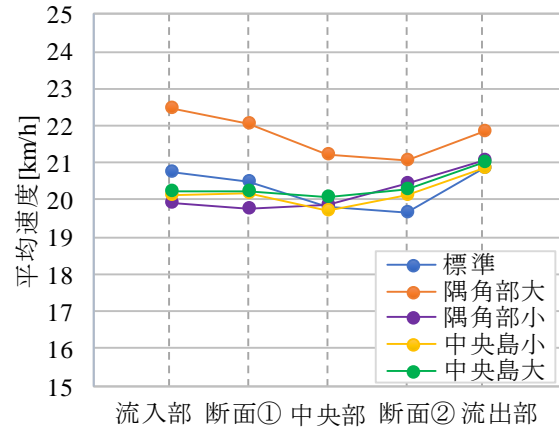


図-8 5つRABの速度比較

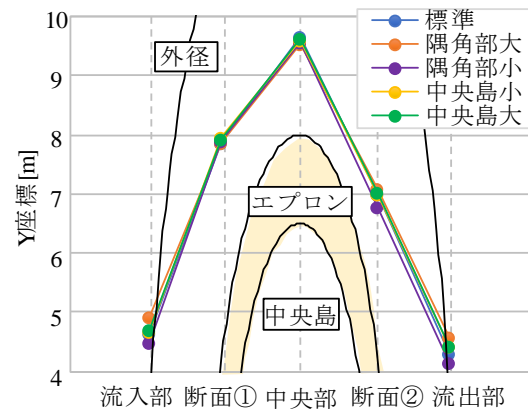


図-9 5つRABの走行位置比較

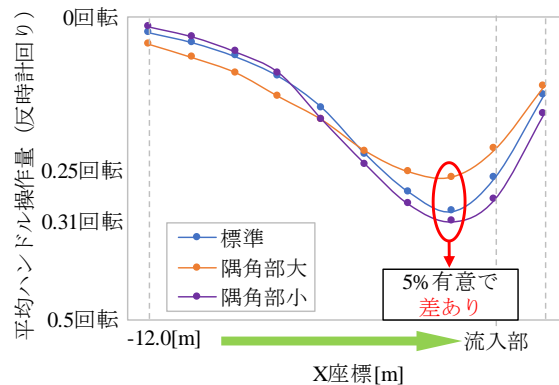


図-10 流入部でのハンドル操作量

あると言える。

中央島直径については、「中央島小」と「中央島大」では、どの断面においても有意な差は得られなかった。本実験において、中央島直径を変化させることで、エプロンへの乗り上げ走行が増えると仮説を立てたが、結果として差は見られなかった。考えられる原因として、一つ目は、DSでエプロンの段差を作れないので、実際の運転環境と違うと考え、二つ目は、DS実験という特殊な状況下のため、意識的にエプロン走行を避けたと考えられる。もしくは、中央島直径を変化させたとしても、環道幅員が変化しなければ走行位置にはあまり影響がない（環道幅員の影響が強い）と考えられる。

③隅角部半径と流入部の関係

上記の速度比較と走行位置比較より、隅角部半径が流入部で影響が強いことが示唆された。そのため、隅角部半径かつ流入部での結果をより詳細に確認する必要がある。

まず、流入部の前12.0[m]と流入部の後2.0[m]の範囲でデータを抽出した。この範囲でのハンドル操作量をグラフ化したものを図-10に示す。「隅角部大」が比較的早い段階でハンドルを操作し始めている。これは隅角部半径が大きいと、隅切りの範囲も広くなるためであると考えられる。「隅角部大」と「隅角部小」でT検定を行った結果、流入部の1.5[m]手前で5%有意な差がある結果となった。

「隅角部大」では全体的なハンドル操作量も少なく、「隅角部小」と比べると、流入し易い傾向があると示唆された。実験後に実施したアンケートでも「運転しやすいRABと運転しづらいRABがあった」、「視覚的には分からないが運転のしやすさに違いがあった」という意見があり、実験者の走行感覚で、隅角部半径は運転のしやすさにも影響があることが確認された。しかし、速度比較でも確認したように隅角部半径が大きくなると速度が速くなる傾向があり、運転のしやすさが上がると、速度も上がり危険になることが危惧される。そのため、運転のしやすさと安全性の両面に配慮した隅角部半径が求められる。

隅角部半径と流入速度や流入位置の関係をそれぞれ図-11、図-12に示す。隅角部半径が大きくなるほど、流入速度が上がり、流入位置がRAB中心から遠くなっている。またその関係性に相関が見られる結果となった。しかし、本実験では隅角部半径のパターンは3種類、小：4.0[m]、標準：8.75[m]、大：15.0[m]のみで行ったため、今後はより多くの隅角部半径でのDS実験が求められる。

④隅角部半径とハンドル操作量

上記で隅角部半径がハンドル操作量に関係し、速度などに影響することが確認できた。そこで、隅角部半

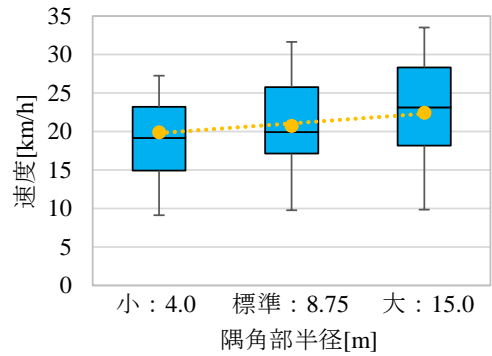


図-11 隅角部半径と流入速度の関係

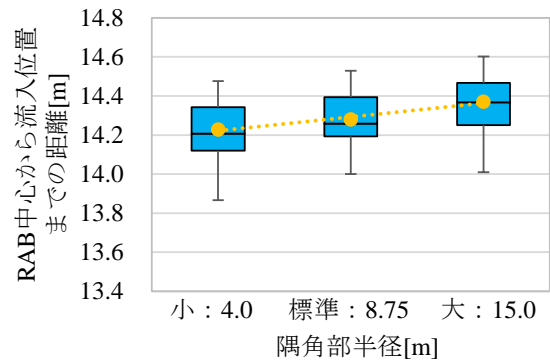


図-12 隅角部半径と流入位置の関係

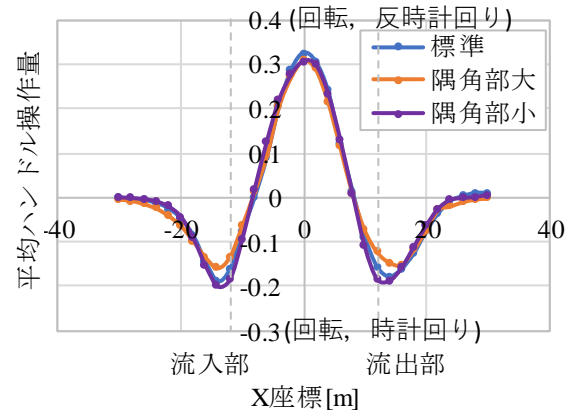


図-13 隅角部半径とハンドル操作量

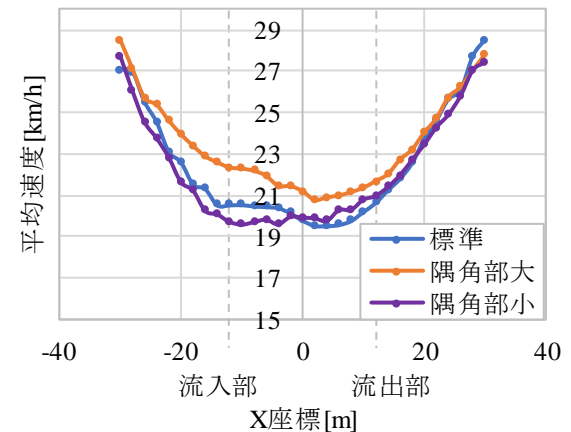


図-14 隅角部半径と速度

径におけるハンドル操作量と走行速度、走行位置についてより詳細に検証するため、X 軸方向において RAB の中心を 0[m]とし、前後 30[m]でデータを抽出した。図-13 に上記の範囲でのハンドル操作量について示す。流入部直前に引き続き、流出部直後でも、「隅角部大」におけるハンドル操作量が「隅角部小」に比べると、少ない傾向が出ている。一方、環道内にハンドル操作量の違いが見られなかった。しかし、図-14 に示した走行速度結果によって、流入部直前と流出部直後のみならず環道内でも「隅角部大」の速度が速い結果となっている。また、「隅角部大」と「隅角部小」の流入速度の差に比べ、流出速度の差は小さくなっている。これは、隅角部半径が大きくなると、流入し易い影響で、流入速度を抑制し難くなり、環道速度も高くなると考えられる。

5. まとめ・今後の課題

本研究では、DSを用いた幾何構造の異なるRABの走行実験を行った。その中で、隅角部半径と中央島直径がRABの走行挙動にどのように影響するかを分析してきた。また、DSによる結果と実在のRABの走行挙動の差についても検証した。

結果として、以下のことが得られた。

- (1)DSを用いたRABの走行実験は、観測されたRABの走行速度に比べて2~3[km/h]遅い傾向がある。しかし、ドライバーの慣れの差や幾何構造が完全に一致してはいない条件もあり、以上を考慮したとき十分に信頼性のある結果が得られたと考えられる。本実験においても幾何構造の影響による走行挙動の差が現れたことから、DSはRABの幾何構造の影響を検討する上で利用できるといえる。
- (2)隅角部半径の影響は、流入部と流出部で確認でき、特に流入部での影響が強い。隅角部半径が大きくなるほど、流入速度が速くなり、流入位置がRAB中心から遠くなる傾向が確認できた。また、ハンドル操作量も隅角部半径が大きくなるほど少なくなり、運転がしやすいという結果が得られた。しかし、走行速度はハンドル操作量のみによるわけではないことも示唆された。
- (3)中央島直径の影響は、今回の実験からは確認することが出来なかった。中央島を小さくすることで、エプロン

部への乗り上げ走行が増えると仮説を立てたが、DS実験では被験者たちは注意を働かせ運転したため、仮説のとおり行かなかったと考えられる。

今後の課題として、より多くのRABの幾何構造条件下での実験が望まれる。特に隅角部半径のパターンを増やした実験を行うことで、より詳細な隅角部半径の影響を明らかにすることが出来る。またその他にも被験者に対し、より現実感を持って実験に臨んでもらう工夫なども必要であると考えられる。

謝辞

実験にご協力いただいた、東京建設コンサルタント 中部支社、川口正様、桐戸健太郎様、奥田進様、また実験者の方々に、感謝を申し上げます。

本研究は、(独)日本学術振興会・科学研究費若手研究(B) NO.17K14743による研究助成を受けている。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) ラウンドアバウトマニュアル, 交通工学研究会, 2016
- 2) 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), 国際交通安全学会, 2015
- 3) 小林 寛, 高宮 進, 吉岡 慶祐, 米山 善之: ラウンドアバウト幾何構造の策定に向けた基礎研究, 国際交通安全学会, Vol.39, No.1, pp.37-46, 2014
- 4) 吉岡 慶祐, 中村 英樹, 下川 澄雄, 森田 紳之: ラウンドアバウトの走行安全性照査手法に関する検討, 第 52 回土木計画学研究発表会講演集, pp.1877-1883, 2015
- 5) 大島 大輔, 山田 康右, 竹之内 篤, 山下 浩行ら: ドライビングシミュレータに対するニーズ及び先進的関連技術に関する調査研究, 生産研究, Vol.67, No.2, pp.87-92, 2015
- 6) WHO: Speed management: a road safety manual for decision-makers and practitioners, 2008

AN ANALYSIS ON THE INFLUENCE OF GEOMETRIC ELEMENTS OF ROUNDABOUT THROUGH APPLYING DRIVING SIMULATOR

Yahiro FUJII, Nan KANG, Shintaro TERABE, Tadashi KAWAGUCHI, Kentaro KIRITO, Susumu OKUDA, Hideki YAGINUMA, Kosuke TANAKA