

ジャンクション走行時の車両走行 加速度/遠心力と道路幾何構造に関する一考察

田沢 誠也¹・大口 敬²・森田 綽之³

¹正会員 首都高速道路株式会社 保全・交通部 (〒100-8903 東京都千代田区霞が関1-4-1)
E-mail: s.tazawa78@shutoko.jp

²フェロー会員 東京大学 生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)
E-mail: takog@iis.u-tokyo.ac.jp

³フェロー会員 日本大学 理工学部 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)
E-mail: hi-morita@i-transportlab.jp

本研究は、都市内の高速道路においてすでに運用されているらせん状ジャンクションの走行性能評価等を行い、現状の課題を抽出した上で、それらの解決策をフィードバックするために走行性能照査型の設計手法について研究し、今後のらせん状ジャンクションの計画・設計に役立てることを目的としている。昨年の研究発表会では、大橋ジャンクションで初めて走行フローティングデータを取得し、走行加減速度等について考察している。その後、道路幾何構造と走行性能との関係性について調べるために、同様のらせん状ループである首都高速道路加平出入口を対象に走行フローティングデータを取得し、道路線形データとの関係性について調査した。また、車両走行方向の加減速度に加えて車両の横方向の遠心力についても走行データから算出し、大橋ジャンクションのような楕円形のループと加平出入口のような円形のループとの比較分析を行った。さらに、コンパクトジャンクションとしてのインターチェンジ形式とランプ取り付け位置の関係に着目した基本図形集を提案・整理をしている。

Key Words : *geometric design, traffic flow data, spiral junction, traffic safety*

1. はじめに

我が国における高速道路のインターチェンジの形式や最適配置に関する研究^{1)~7)}は、1966年~1967年にかけて武部健一によって発表されている。当時の日本は、高度経済成長期における創生期であり、我が国初の都市間高速道路として東名高速道路が建設の最中であった。この東名高速道路のインターチェンジの計画及び建設をどのように行うかという課題に対し、武部健一は日本で初めてインターチェンジの配置や選定に関する研究を行い、知見を取りまとめている。その後半世紀にわたり実務では、当該の知見をもとに全国の高速道路網におけるインターチェンジが整備されている。

武部による研究は、インターチェンジ形式をいくつかのランプ(連結路)の数学的な組み合わせと捉え、すべての可能なインターチェンジ形式の構成法を樹立し、さらに実際に応用可能な形式を200個近く示している。それらの形式のうち、3分の2は武部健一が初めて提案したものとなっている。また、都市間高速道路を主な研究対象としつつも、都市近郊や都心型のインターチェンジまで広範囲な検討がされている。ただし、武部の研究で

体系化されているインターチェンジ形式は、主に交差道路間の交通動線を満足することを目的として整理・分類されているが、事業用地の制限や交差道路間の高低差条件に関する検討はなされていない。

一方で近年の都心部におけるインターチェンジの計画及び設計では、この研究で考慮されていない条件も発生してきている。武部の研究の要請時に比べれば、半世紀後の現在は、市街地の密集状況が格段に高くなっており、当時の想像を超えていると考えられる。また、建設施工技术の進歩も同様である。さらに、自動車の性能や交通量の増加も予想を上回る勢いで発展してきている。

我々が行う研究は、半世紀前の諸条件の中で行われたインターチェンジの形式や最適配置の研究をさらに深化させることで最近の都心部インターチェンジの計画・設計の実務に適用させたいと考えている。とりわけ本稿では、高低差がある交差道路を限られたスペースの中に計画・設計・建設・管理運用するため、実際に管理運用中である首都高速道路の大橋ジャンクション(以下、「大橋JCT」と言う。)と加平出入口の走行フローティングデータを取得し、道路幾何構造の違いによる走行性能の比較し考察をする。これらのデータは、走行性能を評価

する上での基礎データであり、インターチェンジの形式や最適配置に関する研究にドライバーサイドからの視点を入れることによって、走り易さを実感できるインターチェンジとなり、ひいては走行安全性の向上に資するものと考えている。

前述した研究目的に基づき、本稿の2. では、大橋JCTと加平出入口の幾何構造の特徴について説明、3. では、(1)車両走行加速度（以下、「走行方向加速度」と言う。）と車両遠心力（以下、「横方向加速度」と言う。）の算出方法について説明、(2)分析に用いる走行データの特徴について説明、(3)幾何構造の違いによる走行車両挙動について分析、4. では、車両走行データと幾何構造との関係、5. では、(1)らせん状インターチェンジ形式とランプ取り付け配置についての提案と整理、(2)走行性能を考慮したらせん状インターチェンジ形式の選定に関する考察をする。

2. 楕円形インターチェンジと円形インターチェンジの幾何構造の比較

(1) 大橋JCTと加平出入口の主な線形値

大橋JCTと加平出入口で急カーブを示す箇所^①の主な線形値を表-1及び表-2に示す。大橋JCTについては、昨年度の研究⁸⁾で解説しているので、ここでは、主に加平出入口について述べる。また、大橋JCTと加平出入口の平面図、車線構成、縦断面図、横断面構成等について図-1及び図-2に示す。紙面の都合上、大橋JCTの下り勾配区間及び加平出入口の南側ループの下り勾配区間のみ記載している。

表-1 大橋JCTの主な線形値

	曲線半径	縦断勾配	横断勾配	合成勾配
下り勾配	最小 41.5m	- 5.6%	右下り 10%	11.46%
	最大 200m	- 7%	〃 5%	8.6%
上り勾配	最小 57m	4.97%	右上り 10%	11.16%
	最大 200m	6.3%	〃 5%	8.04%

表-2 加平出入口の主な線形値

	曲線半径	縦断勾配	横断勾配	合成勾配
下り勾配	最小 37m	- 8.0%	右上がり 8%	11.31%
上り勾配	最小 38m	6.5%	右下がり 10%	10.31%

加平出入口は、首都高6号三郷線へ一般街路の環状7号線から出入するためのインターチェンジである。入口、出口ともに環状7号線の内外回り両方向へ左折のみでアクセス可能としているため、右折アクセスを可能とするにはそれぞれ二つの円形ループを構築したインターチェンジの形式となっている。表-2からもわかるように、平面的には、曲線半径約40mの単円であり、下り勾配区間は8%、横断勾配も8%であり、合成勾配が11.31%となっている。設計速度が30km/hであり、構造令のほぼ最小値からなっている。上り勾配区間も同様に急なカーブと急な勾配から設計されているが、街路から進入して約150mの場所に入料金所があるため、全線約500m区間の中で料金所周辺の約100m区間は、縦断勾配が緩和されている。表-1の大橋JCTの線形値と比較すると、大橋JCTの最小曲線半径と同様の曲線半径を持つ円形ループが連続しており、加平出入口の合成勾配もほぼ大橋JCTと似かよっている。ただし、加平出入口は、交差接続するための道路間の高低差が大橋JCTの約半分であるため、ループ長も大橋JCTの約800m対して加平出入口は約300mと短くなっている。これら2つのインターチェンジは、いずれも都心部の密集市街地で交差道路接続をするための条件をクリアするべく、計画・設計・施工・管理運用している代表例と言える。

3. 幾何構造の違いによる走行データの比較

(1) 走行方向加速度と横方向加速度の算出方法

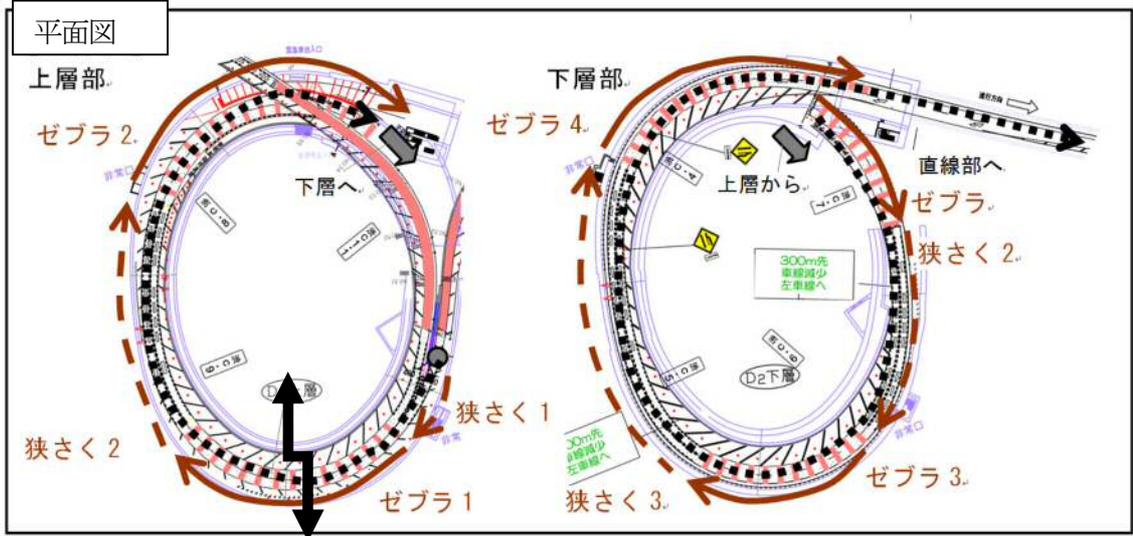
a) 走行データ取得方法

走行フローティングデータの取得には、車両のカーコンピュータから出力される車速パルス信号データを取り出し、車両に持ち込んだパソコンにそのデータを一定パルス周期ごとに記録していくことによって、その車両の走行速度、走行距離及び走行時間を算出できるスピードレコーダー（速度・積算距離測定システム）を用いておこなった。

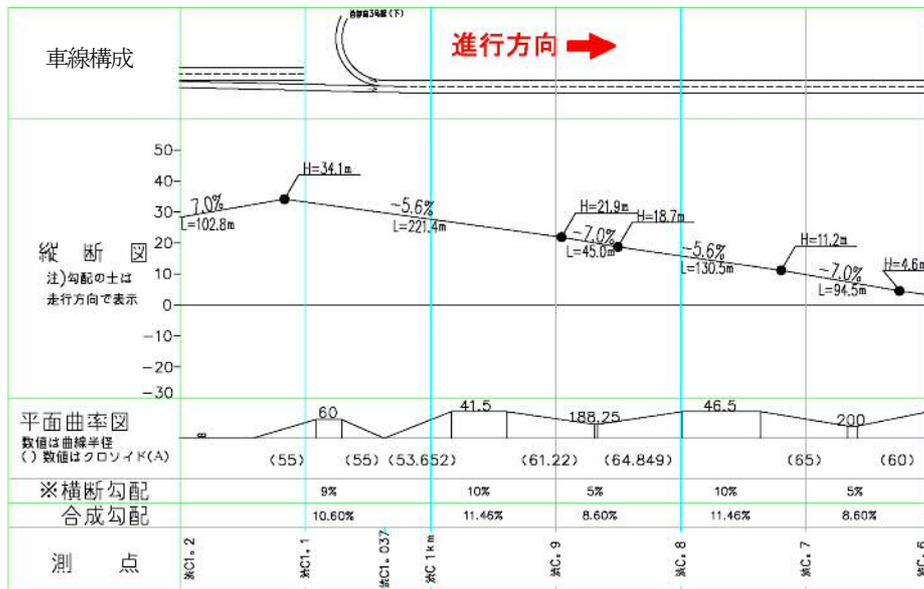
なお、調査日時と被験者数及びサンプル数については、以下の表-3に示す。

表-3 調査日時とサンプル数

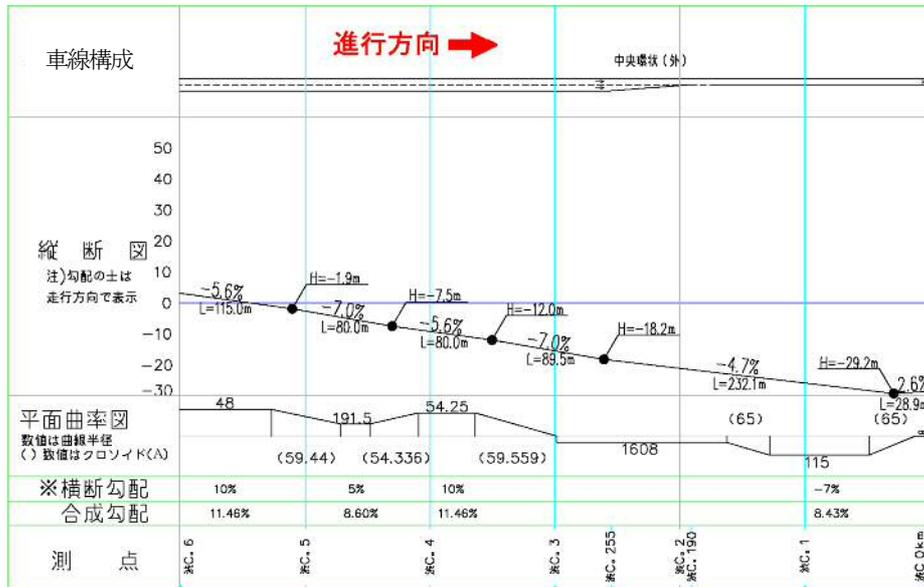
		大橋 JCT	加平
調査日		3/23(日)	3/27(木)
調査時間		0～4時	9～17時
被験者数		8	4
サンプル	上勾配	18	20
	下勾配	16	22



■上層部



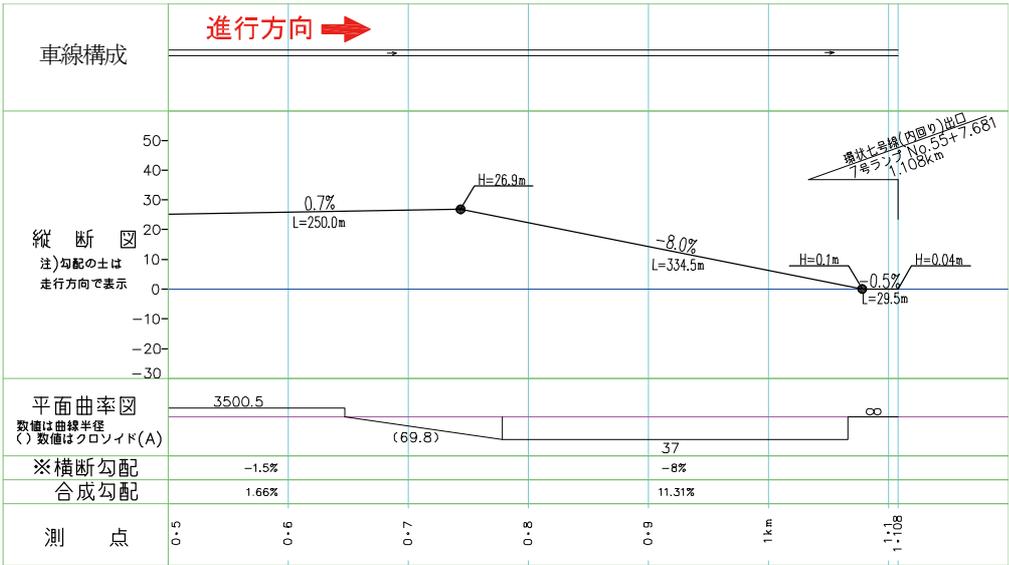
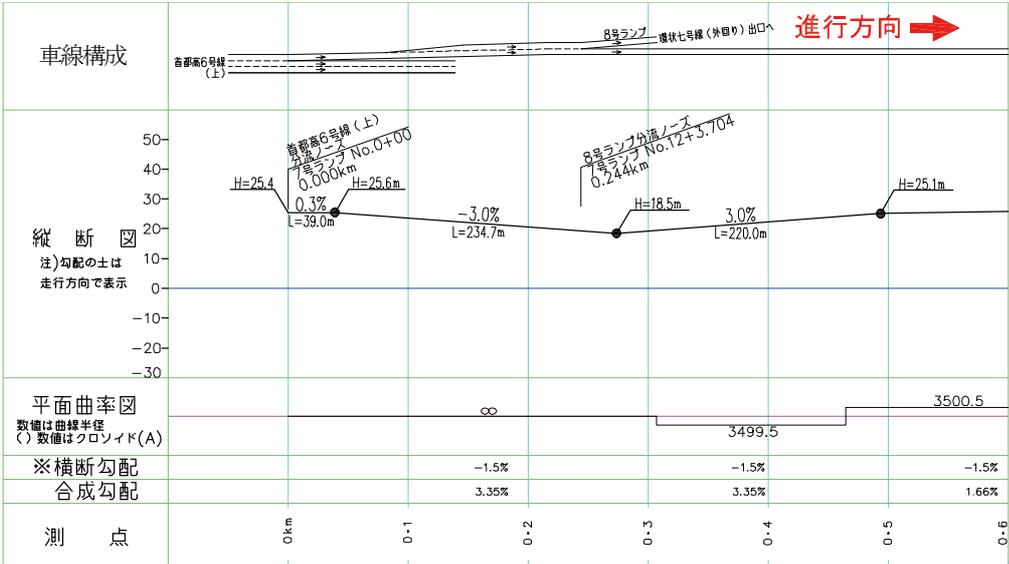
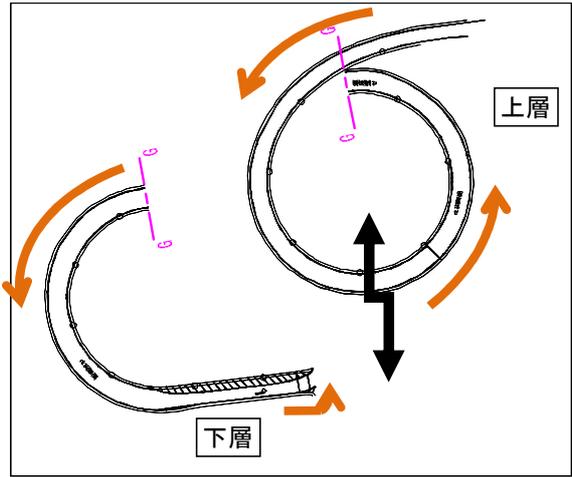
■下層部



※横断!

図-1 大橋JCT下り勾配の道路幾何構造図

平面図



※横断勾配 進行方向 左下がりー
右下がり+

図-2 加平出口下り勾配の道路幾何構造図

b) 走行方向加速度の算出

本稿で算出した走行方向加速度については、以下に示す。

$$a_{\text{走行}} = \left\{ (V_2 - V_1) \times \frac{1000}{3600} \right\} / \left\{ 10 / \left(V_1 \times \frac{1000}{3600} \right) \right\}$$

$$= \frac{5V_1(V_2 - V_1)}{648}$$

ここで

- $a_{\text{走行}}$: 走行方向加速度 (m/s²)
- V_1 : 上流地点の速度 (km/h)
- V_2 : 下流地点の速度 (km/h)
- ※上流地点と下流地点の距離10m

c) 横方向加速度の算出

横方向加速度の算出については、以下の通りであるが、ここで計算している値は横断勾配の影響を考慮していないものである。横断勾配の影響を考慮した場合は、ここで求められる $a_{\text{横}}$ に $\cos \theta$ を乗じることになる。よって、加速度の絶対値がいくぶん小さくなるが、横方向加速度の傾向に変化はないものと考え、現在はその値で評価している。ただし今後は、道路幾何構造との詳細な関係性を分析する上では、道路の横断勾配に沿う横方向加速度の値が及ぼす影響を考慮した分析が必要と考えている。

$$a_{\text{横}} = \left(V \times \frac{1000}{3600} \right)^2 / R$$

$$= \frac{25V^2}{324R}$$

ここで

- $a_{\text{横}}$: 横方向加速度 (m/s²)
- V : 速度 (km/h)
- R : 曲線半径 (m)

なお、クロソイド区間の曲線半径については下式より算出した。

$$R = A^2 / L$$

ここで

- A : クロソイドパラメータ (m)
- L : クロソイド原点(曲率0)からその点までの曲線長 (m)

(2) 分析に用いる走行データの特徴

a) 追従走行と単独走行のデータ比較

昨年度計測した走行フローティングデータは、交通流の現状を把握することを目的として、極力追従走行を試みましたが、今回測定した加平ランプは、追従走行を行うには、元来の交通量が少ないため自然と単独走行になってしまう。そこで、単独走行と追従走行の違いを把握した上で、幾何構造の違いによる走行データ等の比較を行うこととする。図-3は、大橋JCTにおける単独走行と追従走行の結果を示す。

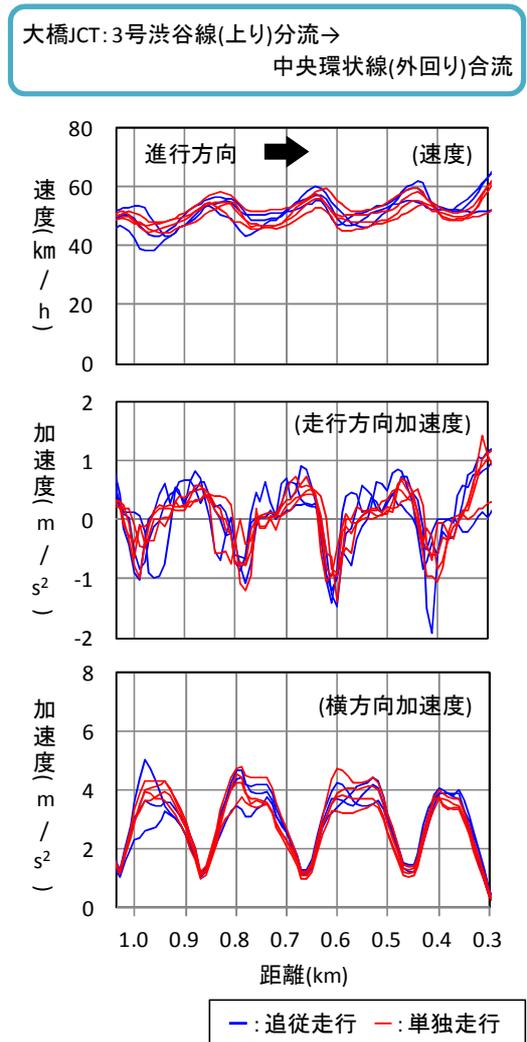


図-3 追従走行と単独走行の走行データ比較

これによると、走行速度、走行方向加速度、横方向加速度ともに若干の差異が見られるが、道路幾何構造の影響の現れ方は同様であることがわかる。よって今回の測定時には、大橋JCT及び加平出入口ともに単独走行のデータを取得し、楕円形インターチェンジと円形インターチェンジの違いによる走行時影響の分析をすることとする。

b) 調査時の交通状況

今回の調査データは、単独走行のデータを得るため大橋JCT周辺の交通状況が完全にフリーな状況である日曜日の夜間早朝でおこなっている。加平出入口の上下流の高速本線の平日昼間は渋滞しているが加平出入口そのものは、利用交通量が少なく平日昼間でもフリー走行が可能である。フリー走行の交通状況については、超音波車両感知器から得られる速度データからも確認している。

(3) 幾何構造の違いによる走行車両挙動の比較

走行データは、前述のとおり大橋JCT及び加平出入口の上り勾配区間と下り勾配区間でサンプリングしているが、本稿では道路幾何構造の違いによる走行変化がより顕著であった下り勾配区間についてのみ記載する。

図-5は、加平出口下り勾配区間の走行速度及び走行方向加速度、横方向加速度の変化を示している。また、図-6は、同様に大橋JCTの下り勾配区間の走行データを示している。

図-5の加平出口（-8%及び曲線半径37mの左回りの下り勾配区間）の走行データを見ると、走行速度が約40km/hとほぼ一定であり、走行方向加速度と横方向加速度もほとんど一定であった。これに対して、図-6の大橋JCTでは、最少曲線半径区間で走行速度が減速するため、走行方向加速度がマイナスになり横方向加速度（遠心力）が大きくなる傾向が見取れる。このことから、円形のインターチェンジの方が楕円形のインターチェンジよりも走行し易い可能性が考えられる。また、全線覆蓋構造である大橋JCTとオープンな空間である加平出口の走行空間条件からは、進行方向の見通しが良し悪しに大きな違いがある。加平出口は曲線半径が37mの円形インターチェンジであるため、オープンな空間での進行方向の視野は広範囲で視認可能となるため、ドライバー心理からするとどれくらいの速度でカーブに進入すれば安全かを感じ易いのではないかと推定される。この点でいうと、大橋JCTは、全て閉塞空間であるため進行方向への対する進入速度の予測が曖昧になり易いと予想され、その結果、急ブレーキ的な動作によって走行方向加速度に大きな変化が生じ、それに伴って横方向加速度の変化も大きいものと推定される。

このように円形と楕円形の違いによる走行現象とドライバーの運転状況の差は、図-4の中で示す様に起終点の速度差や走行方向加速度の最大・最少の差及び横方向加速度の最大・最少の差からも円形の方が相対的に変化が少ないことから見て取れる。

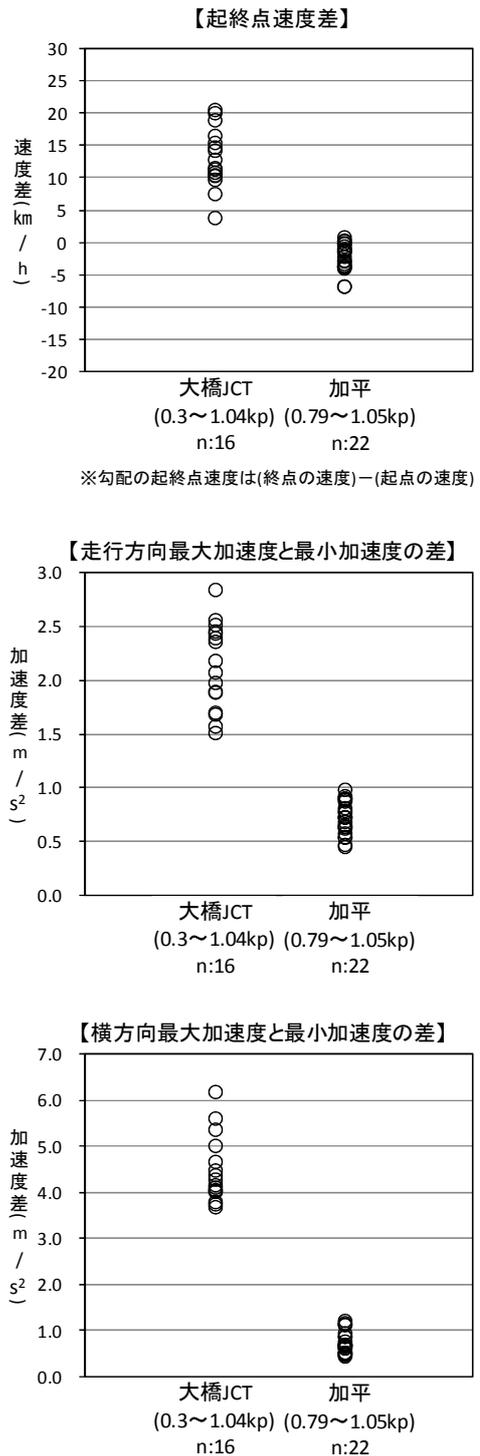
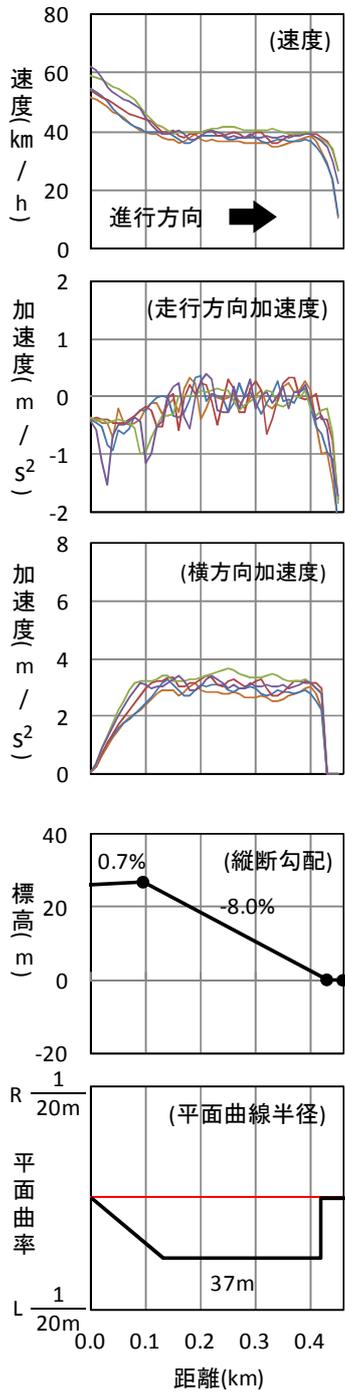


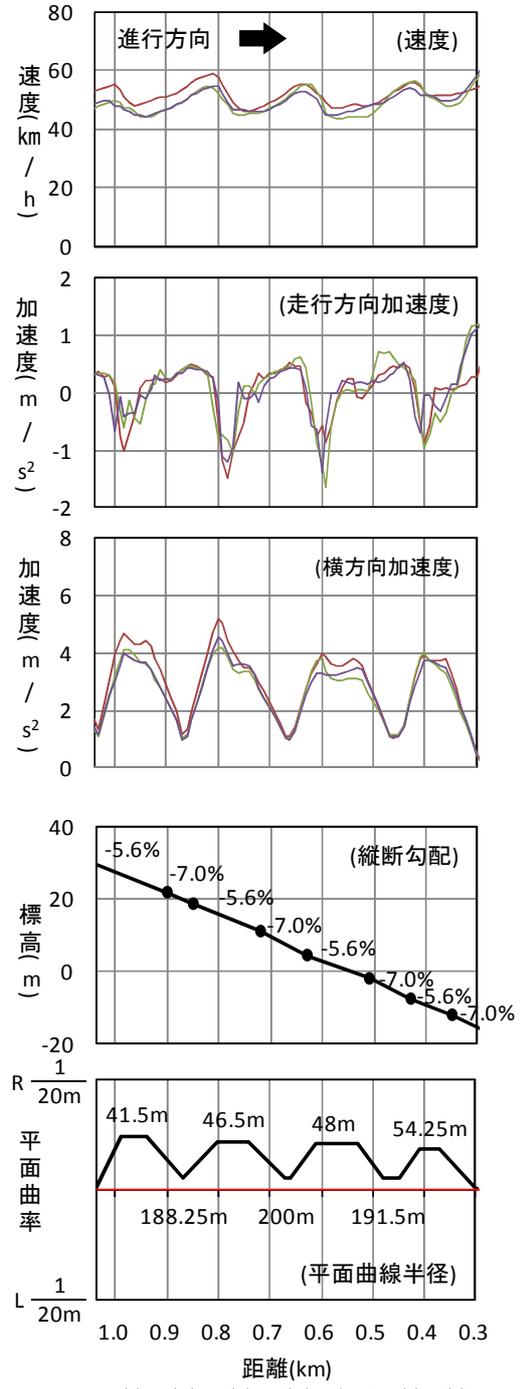
図-4 大橋JCTと加平出入口の各走行データの差分

加平出口: 6号三郷線(上り)分流環七分流ノーズ→
環七(内回り)合流



※横断勾配 8%
右上路
※合成勾配 11.31%

大橋JCT: 3号渋谷線(上り)分流→
中央環状線(外回り)合流



※横断勾配 10% 5% 10% 5% 10% 5% 10%
右下り 右下り 右下り 右下り 右下り 右下り 右下り
※合成勾配 11.46% 11.46% 11.46% 11.46% 11.46%
8.60% 8.60% 8.60%

図-5 加平出口下り勾配区間と走行速度等変化

図-6 大橋JCT下り勾配区間と走行速度等変化

走行データ取得時にそれぞれのインターチェンジの運転操作状況は前述した走行データの分析と同様であり、大橋JCTでは、頻繁にブレーキのオン・オフがあること、ハンドル操作も右に何回も大きく切ったり小さく切ったりと一定ではなかった。加平出口では、ブレーキとハンドル操作は、ほぼ一定して運転できている印象があった。

また、この二つのインターチェンジの事故の特徴としては、加平出口はバイクの転倒・施設接触事故が多いことがあげられる。首都高本線の事故総数に対するバイク事故件数の割合が1%なのに対し、加平出口では、その割合が40%にもなっている。大橋JCTについては、貨物車の横転事故が多いという特徴がみられることは、昨年度の研究⁸⁾で述べている。

4. 車両走行データと幾何構造との関係

昨年度から引き続き行っている本研究の走行データと幾何構造の関係性に関する分析結果として、楕円形インターチェンジと円形インターチェンジでは明らかに走行特性の違いが見られることがわかった。

これによって、同一形状のらせん状インターチェンジでも幾何構造の違いによって、走行性能におよぼす影響が存在することが定量的に把握できたことになる。ここでいう幾何構造とは、インターチェンジの形式だけでなく、インターチェンジを構成する曲線半径、ループ距離、横断勾配、縦断勾配、空間構成（閉塞またはオープン）、ランプ取り付け配置などインターチェンジを構成する全ての線形要素となる。これら線形要素が走行区間的に一樣にならないらせん状インターチェンジでは、一定の走行状態を保つことは困難であることが実測した走行データからも証明されている。

したがって、交通流の相互関係を示している動線結合から位相幾何学的に分類・提案されたインターチェンジ形式からの選定だけでは、厳密にインターチェンジ内の走行状態の変化まで考慮しているとは言えず、開通後の運用結果として交通安全性の問題や渋滞の発生等を引き起こすことになる。本研究では、走行性能を考慮した道路幾何構造の改善要素を発見し、現状の交通流に合わせたインターチェンジの整備が可能となることを目標としている。そのためには、らせん状インターチェンジの走行データの分析に基づき、インターチェンジ形式とランプ取り付け配置の関係及びインターチェンジ内の線形要素について微細な車両挙動との関係性を明らかにすることが重要と考えている。現在のところ、すべての走行データは収集されていないが、走行データとの

関係性を明らかにするための新たなインターチェンジ形式等について、次章で述べることにする。

5. インターチェンジ形式とランプ取付位置

(1) らせん状インターチェンジとランプ取り付け配置の提案と整理

交差する接続道路の高低差が大きい場合のインターチェンジ形式及びランプ取り付け位置の条件については、近年、過去の研究では想定し得ない要請が発生しているため、現在の条件に合わせた計画・設計をおこなう場合、今までの知見等は参考にならなくなっている。実務において、都市内の密集市街地におけるコンパクトなジャンクションの計画・設計については、道路構造令のランプ線形の条件を組み合わせたもの適用する形で実施しているため、総合的なコンパクトジャンクションそのもののあり方については整理されていないことになる。換言すれば、必ずしもインターチェンジそのものの走行性等を考慮した設計にはなり得ていないと考えられるため、本稿ではあらためて都市内の密集市街地の条件に合うコンパクトなインターチェンジ形式とランプ取り付け位置について、高低差のある場合のらせん状インターチェンジ形式として基本図形集図-9ないし図-12を提案をし、その特徴について次項に整理した。この中で現在の大橋JCTは、図-11であるが、都市計画当初は図-10の形式を取っていた。大橋JCTを図-11のような形式に変更したことにより、インターチェンジの建設に必要な事業範囲が約6分の一になっている。図-9は、加平出入口を示している。環状7号線の右折禁止により一か所のループではフルアクセスができないため2か所のループ構造で高低差を稼いでいる。

(2) 走行性能を考慮したらせん状インターチェンジ形式の選定に関する考察

図-7と図-8は、武部健一の研究^{1)~7)}の中でも提案されているインターチェンジ形式であるが、これらインターチェンジが成り立つ条件としては、高低差が比較的小さい道路の交差接続を行う場合としたものであり、このような一般的な条件下では、広く国内で適用されている。

図-9ないし図-12は、らせん状インターチェンジとしては同様の形式ではあるが、ランプの取り付け角度の違いによって、ドライバーの進行方向から感じ

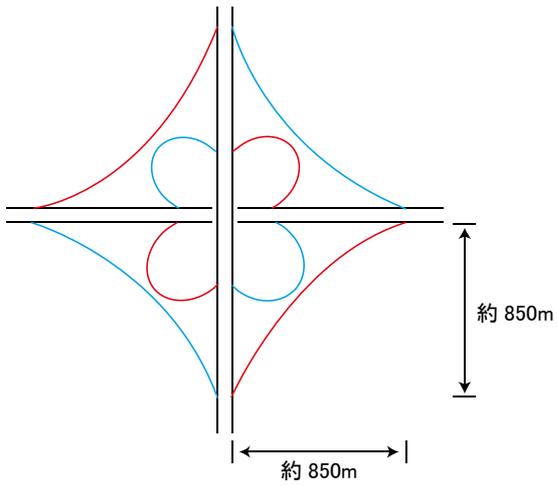


図-7 クローバー型インター
(高低差75mを接続する場合)

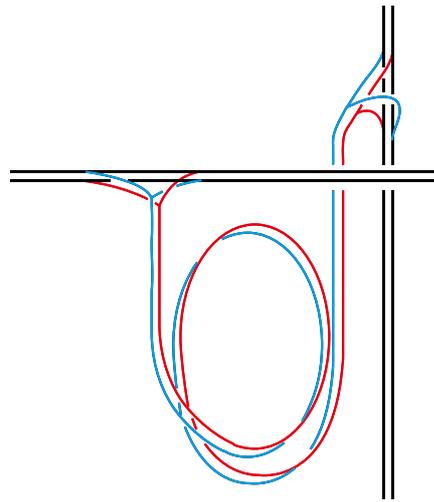


図-10 らせん状インター(B)

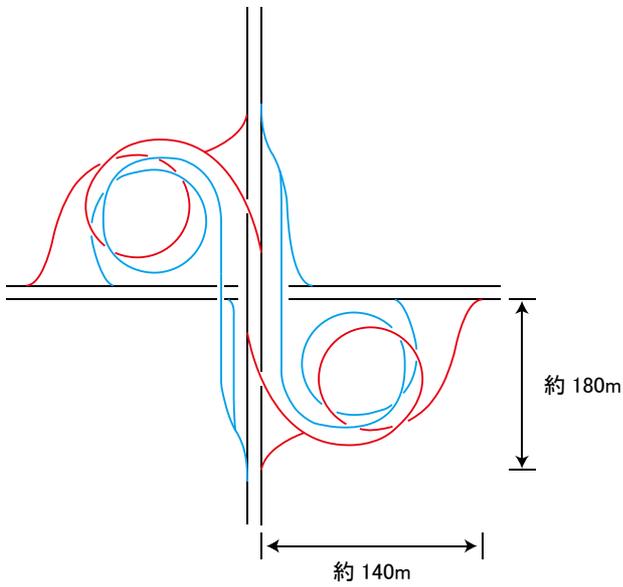


図-8 めがね型インター (加平出入口)

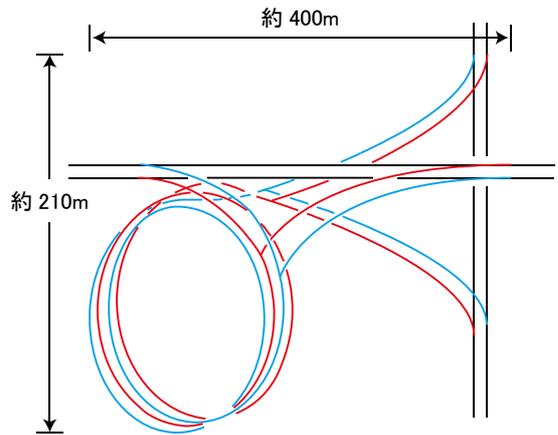


図-11 らせん状インター(C) (大橋JCT)

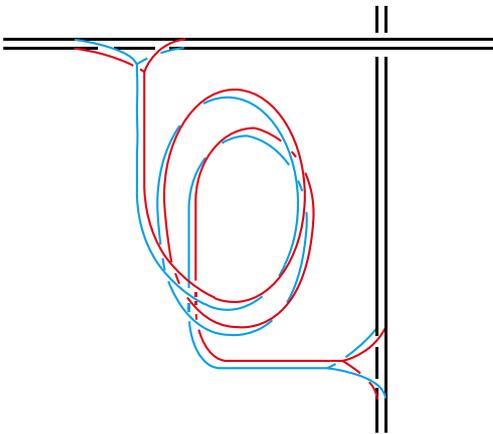


図-9 らせん状インター(A)

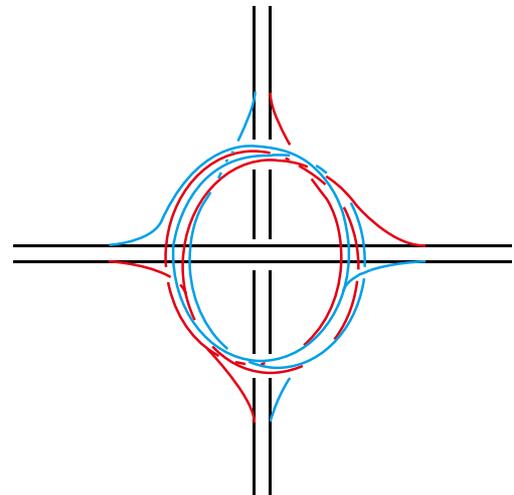


図-12 らせん状インター(D)

得る方向感覚のずれの大小が存在するものと推定できる。らせん状インターチェンジ (A) 及び (D) は、運転者の方向感覚と整合しているが、らせん状インターチェンジ (B) 及び (C) は、進行方向と逆にハンドルを切るため運転者の方向感覚とずれが生じやすいと考えられる。しかし、これららせん状インターチェンジは、短い距離でかつ閉塞空間で2回転しているうち、既に方向感覚を失ってしまう可能性もある。これら方向感覚とのずれを定量化して評価するためには、進行方向の左右進入角度で分類されたランプ取付配置との関係性を分析し、ドライバー心理状態と照らし合わせた、走行環境条件に関する研究が必要と考えている。

高低差があるインターチェンジを建設するための事業用地の観点からみると、一般的なクローバーリーフ型であると75mの高低差を確保するためには一方向約850mのランプが必要となるため、インターの一边が約1700mの正方形の用地が必要となる。これに比べて大橋JCTの事業用地は、約200m×約400mであるので面積比でいうと約40分の一の広さで済むことになる。このことから、都心部の密集市街地において高低差がある場合のインターチェンジ計画では、らせん状インターチェンジから得られる社会的経済効果は多大なものとなることが推定される。今後は、この観点からも定量的な評価ができる論理を構築していきたいと考えている。

建設技術の観点からは、らせん状インターチェンジ (A) ないし (C) は、都市内で求められる非開削トンネル工法で十分に施工可能であるが、らせん状インターチェンジ (D) は、オール開削工法でのみ施工可能と考えられるため、都心部の密集市街地の建設には向かないと考えられる。この形式は、一般街路でいうところのラウンドバウトに近い交通の流れとなるため、交通流動的にはドライバーの進行方向とのずれがすくなく、分合流の織込みもスムーズであり走行安全性が高いと言えるが、都心部の建設物としての実現性に乏しいことが最大のネックであると考えられる。

6. おわりに

昨年度から継続して、密集市街地の中で高低差のある道路同士を接続しなければならないような状況にある場合の走行特性と道路幾何構造の関係性についての基礎データを収集及び分析をおこなってきている。道路幾何構造では、楕円形と円形の違いについて着目し、ドライバーにかかる負担を車両前後方向と横方向の加速度で評価した結果、明らかに楕円形の方の運転挙動が複雑であることがわかった。しかし、それら運転挙動の違いが交通事故へおよぼす影響については、新たな視点であるドライバー心理状態を把握できるデータ取得が必要になってくると考えている。

また、今回は交通安全性に着目するため、下り勾配区間における道路幾何構造の比較評価をしているが、上り勾配区間についても同様にデータ取得しているため、上り勾配の影響による交通容量低下に伴う渋滞問題に対する評価もしなくてはならないと考えている。これは、上り勾配区間における交通容量がどの程度低減されているかを突き止めることになる。近い将来、品川線が開通し、大橋JCTが4枝ジャンクションとなると上り勾配の交通容量低減に加えて、織込みによる影響も付加して考えることになる。品川線開通までの間に現在の織込み交通無しでの基礎データを取得し、開通後の交通状況と比較検討することで、この問題を解決していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 武部健一：インターチェンジの型式について (I)、高速道路と自動車第4号「研究」、1966
- 2) 武部健一：インターチェンジの型式について (II)、高速道路と自動車第5号「研究」、1966
- 3) 武部健一：インターチェンジの型式について (III)、高速道路と自動車第6号「研究」、1966
- 4) 武部健一：インターチェンジの型式について (IV)、高速道路と自動車第11号「研究」、1966
- 5) 武部健一：インターチェンジの最適配置 (I)、高速道路と自動車第1号「研究」、1967
- 6) 武部健一：インターチェンジの最適配置 (II)、高速道路と自動車第2号「研究」、1967
- 7) 武部健一：インターチェンジの形式に関する研究、土木学会論文集第144号、1967
- 8) 田沢誠也、大口敬、森田緯之：高低差があるらせん状ジャンクションの幾何構造と走行速度変化等の関係、第48回土木計画学研究発表会、2013

(2014.4.25 受付)

STUDY ON ROAD GEOMETRY AND VEHICLE ACCELERATION/ VEHICLE CENTRIFUGAL FORCE IN JUNCTION CURVE

Seiya TAZAWA, Takashi OGUCHI and Hirohisa MORITA

The purpose of this article is to contribute to the future planning / design of spiral junctions by extracting the current problems by the evaluation of the driving performance for the current spiral junction which is already operated in the urban expressway, and studying of the driving performance inspection- based designing method to find solutions for the current problems. In the last year's conference, acceleration / deceleration speed etc. have been already analyzed at Ohashi junction by collecting actual traffic flow data for the first time. As a next step, the traffic flow data at Kahei ramp of Metropolitan Expressway which has a similar spiral structure with Ohashi junction is collected in order to analyze the relationship between those geometric designs and readabilities. Also, not only the acceleration / deceleration speed, but also the horizontal centrifugal force of a vehicle is calculated by the floating data to do the comparative analysis between oval loop structure like Ohashi junction and round loop structure like Kahei ramp. Furthermore, basic diagrams are suggested and organized to show the relationship between interchange types as a compact junction and the connecting points of ramps.