

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

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

近年、事業用地の制約が厳しい都市内の高速道路建設において、広範な事業用地の確保が必要とされるジャンクション部の建設は、多くの課題に取り組みながら実現している。その一例である首都高大橋ジャンクションは、これらの課題をクリアするためにジャンクション建設用地を最小限にし、また、ジャンクション自体を覆蓋化することで沿道環境に最大限配慮している。一方で、このらせん状ジャンクション内を走行するドライバーにとっては、高低差のある閉塞空間を回転しながら目的地を選択しなければならないため、走行時のストレス負荷は大きいものとなる。そこで、このらせん状ジャンクションの走行特性と幾何構造の関係を明らかにすることが、ドライバーのストレス低減に資するものと考えられる。本稿は、代表的ならせん状ジャンクションである大橋ジャンクション内の走行実態を把握するためフローティング調査等を行い、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の関係性を分析した。それらの結果を今後のコンパクトなジャンクションを計画・設計する場合の指針としてフィードバックすることを目的としている。

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

1. はじめに

高速道路沿道の環境対策については、密集市街地に都市内高速道路を計画・設計・建設する場合、まちづくりの観点からも細心の注意が必要となっている。そのため、近年建設されている都市内高速道路は地下空間の利用を最大限活用する方向で実施されている。

その一例である大橋ジャンクション（以下、「大橋JCT」と言う。）は、地下構造である中央環状新宿線（山手トンネル）と高架構造である高速3号渋谷線を接続するジャンクションであり、最大高低差約70mの路線を限られた敷地内で接続するため、急勾配のループかつ覆蓋構造という特殊な構造(図-1)である。一般的にタービン型やクローバー型などのジャンクションでは、ジャンクションの一部分をループ構造を採用して構成しているが、ジャンクションの全体をループ構造のみで構成し、かつ曲線半径、縦断勾配及び横断勾配が時々刻々と変化する事例は、稀である。このような幾何構造をもつジャンクション内を運転する場合、実勢速度が設計速度を上回るにより生じているであろう見通しの悪さやドラ

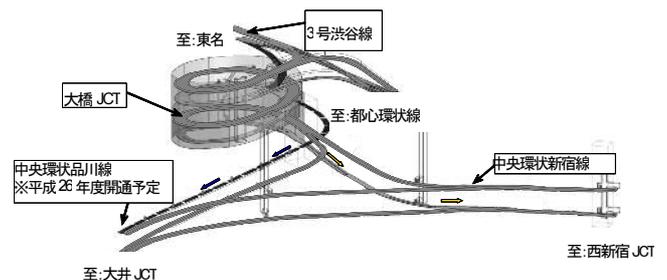


図-1 大橋 JCT 概要図

イバーの空間認知能力の低下などの視環境に課題があり、ドライバーが持つストレスは多大なものとなることが予想されていた。そのため、大橋 JCT 開通前に安全に案内誘導を行うための走行支援策の検討¹⁾などを過去数年にわたり実施している。それらの検討の結果、大橋 JCT 開通後3年が経過した現在に至るまで、大規模な事故は発生していないことから、現在実施している走行安全性向上策は、一定の成果があったと考えられる。

しかし、この安全対策・走行支援策は主にソフト的な対策を中心に行っており、らせん状ジャンクションそのものの幾何構造に着目したハード的なアプローチからの調査・研究は実施されていないため、今後同様の条件下でらせん状ジャンクションを導入しようとした場合に、交通安全上、交通円滑上の観点から最適な幾何構造条件等の構造は、依然として明解ではない。

本稿は、世界でも類をみないらせん状ジャンクションの交通流現象に着目し、交通流の実態を明らかにすることを目的とする。大橋 JCT 内の走行速度変化等の交通データ及びドライバーの意識等を調査・分析し、らせん状ジャンクション内で何が起きているのかを解明し、横断勾配と縦断勾配が連続的に複雑に変化するらせん状ジャンクションにおける安全・円滑両面から一定の交通サービス水準を確保するために必要な道路幾何構造の新たな一般的指針を見出すための基礎資料とする。

現状の大橋 JCT は、3 枝ジャンクションで運用しているが、2 年後には、品川線が接続されることにより、全方向へ出入り可能な 4 枝ジャンクションとして機能を発揮する必要が生じる。それに伴い、現在は分合流なしの 2 車線運用が可能な大橋 JCT 内の交通運用が、分合流を有する 3 車線運用に変化する。その結果、現在ほとんど生じていないジャンクション内の織込み交通が頻繁に発生することになるため、品川線開通後には 4 枝ジャンクション後の交通実態を新たに把握し、現状との違いが交通実態に与える影響を定量的に評価する予定である。

上記背景を踏まえて、2. では、(1)大橋 JCT の道路幾何構造の特徴について説明、(2)大橋 JCT の車線運用についての説明、(3)フローティング走行調査の分析、(4)大橋 JCT 内の事故発生状況、(5)大橋 JCT 内の走行ドライバー意識調査、(6)大橋 JCT 走行時のアイカメラデータ取得等について順を追って分析し、道路幾何構造、交通流現象及びドライバー心理に着目した調査結果について取りまとめる。また、3. では、らせん状ジャンクションの走行性能に係る影響要因の抽出を行い、今後の研究の方向性を提案する。

2. 大橋JCTの幾何構造と交通流の現象分析

(1) 大橋JCTの主な線形値

大橋JCTは、図-3及び図-5に示すように楕円状のループが2回転する構造となっている。主な線形値については表-1の通りである。図-2は、大橋JCTループ内の品川線分岐部の構造断面を示す。大橋JCTは、地下トンネルから高架までの最大高低差約70mを接続しなければならないため、大橋JCT内の縦断勾配が最大7%になっていること、また、限られた建設用地内に収めるため、ジャンクションをコンパクト

ト化しており、その結果、図-3の▲で示す断面位置で最小曲線半径が41.5m、最大合成勾配が11.46%になっている。図-4は、横断勾配と縦断勾配だけでなく、合成勾配も時時刻々と変化する様子を表している。

平面線形上の特徴としては、最小曲線半径41.5m、最大曲線半径200mの組み合わせの間に緩和曲線(クロソイド曲線)を入れるが、この緩和曲線長が短い点が挙げられる。それによって、走行するドライバーにとっては、小刻みなハンドル操作を余儀なくされ、カーブの先が見えにくい閉塞空間と重なって、心理的に緊張感が増加している可能性がある。

表-1 大橋JCTの特徴的な線形値

	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%

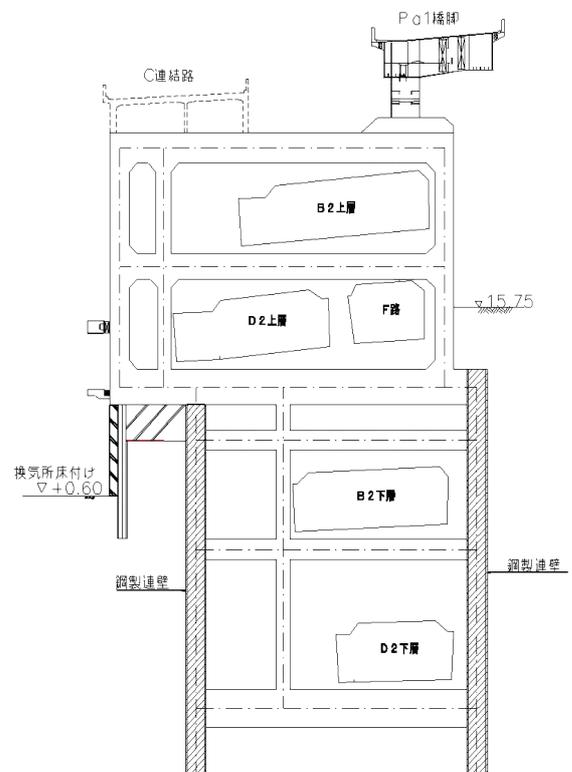
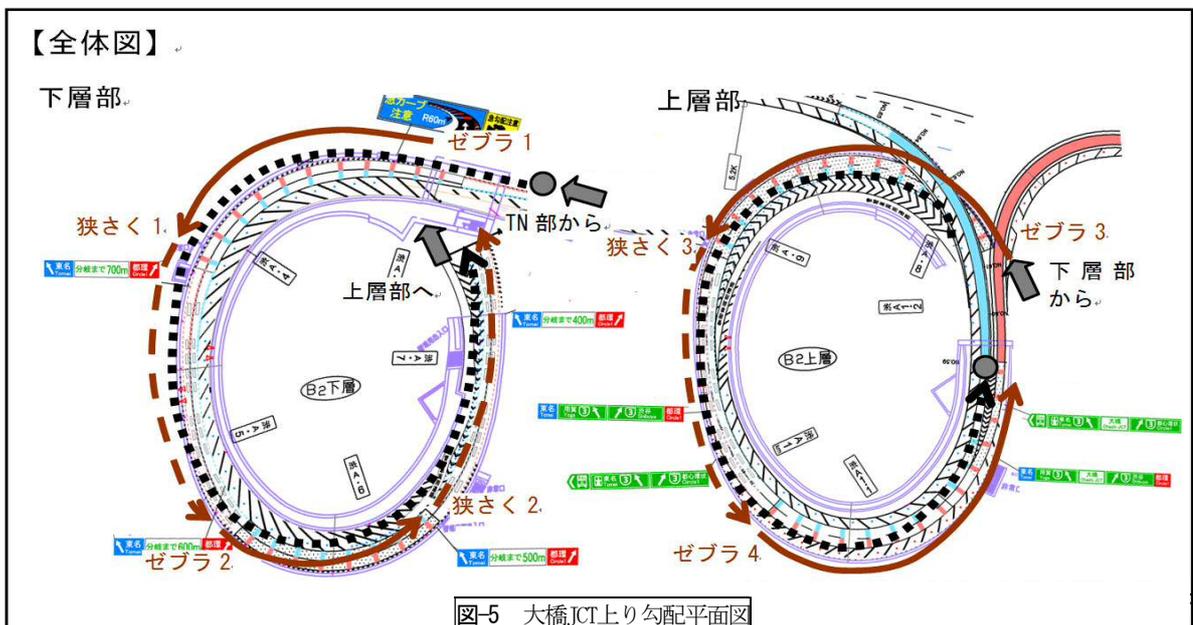
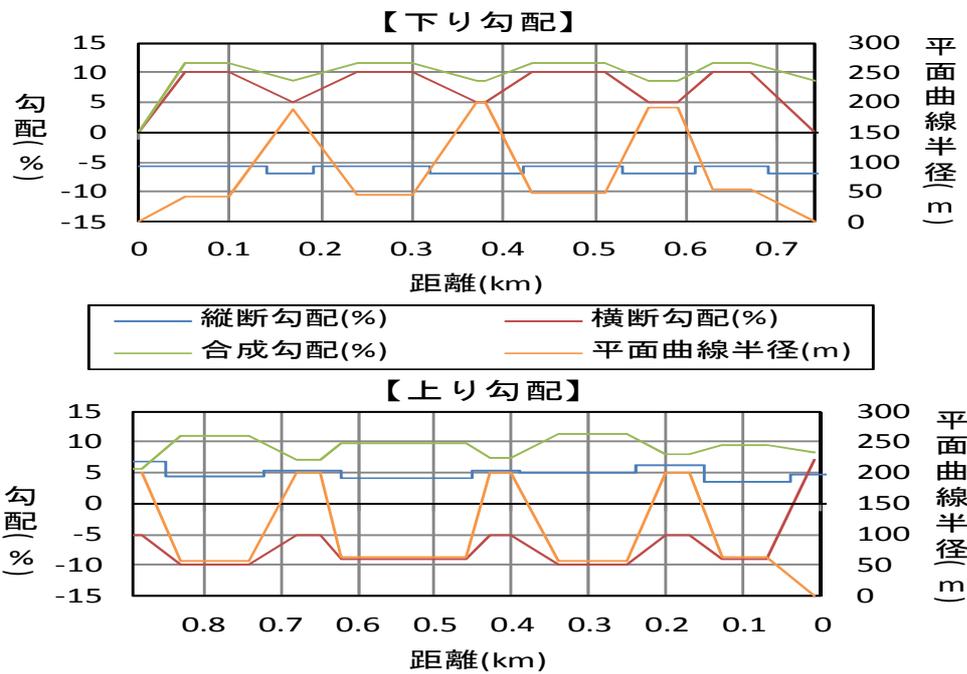
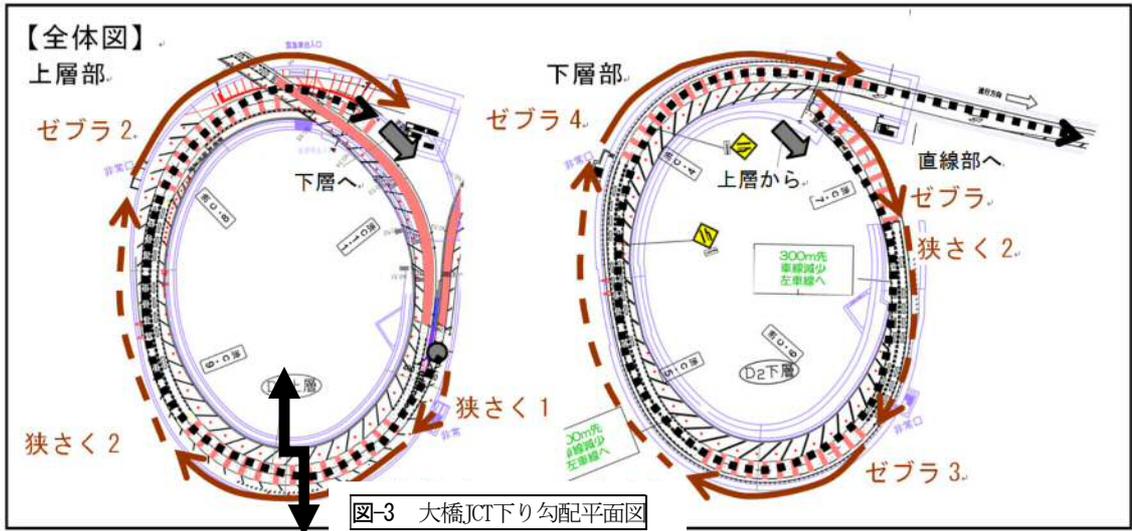


図-2 大橋JCT品川線分岐部の断面図



(2) 大橋JCT内の車線運用

現在の大橋JCTは、3枝ジャンクションで運用しているため、ジャンクション内は、上り勾配区間、下り勾配区間ともに2車線運用となっている。需要交通量からも2車線で十分に捌ききれするため、ジャンクション内を先頭とした渋滞はほとんど発生していない。ただし、上り勾配の3号線下りへの最終出口付近で、3号線下り三軒茶屋出口からの渋滞が延伸した際、大橋JCT内にも速度低下が発生していることがある。また、2車線間の織込み交通は、2経路選択をわかり易く実施できるよう、カラー舗装や補助看板を適切に配置した結果、ほとんど発生していない状況である。

2年後の品川線開通時には、4枝ジャンクションとなりループ内を3車線運用する予定である。さらに、下り勾配部には品川線への分流区間が設置され、上り勾配部には品川線からの合流区間が設置される。これにより、ループ内では最大2車線跨ぎの車線変更が可能のため、現在はほとんど発生していない織込み交通現象が増加することが予想される。

(3) 幾何構造と走行速度変化

a) データ取得方法

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、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。パルスデータは、タイヤ1回転で約4パルスを出力している。走行に際しては、大型車に追従するサンプル数が目標値に達するまでは大型車への追従を狙って走行し、その結果として追従を行った車両の車種を普通車・大型車の2車種に区分してサンプルデータを整理した。



写真-1 大橋JCT内走行視距状況

調査日時は、本年6月18日（火）と19日（水）の2日間、4時～16時の12時間帯でおこなった。そこで取得された地点間走行速度と地点間走行時間から、上り勾配及び下り勾配の走行速度変化と加減速に伴う加速度を算出している。

b) 調査時の交通状況

調査日時の大橋JCT周辺の交通状況については、9時までは、3号線上り方向、下り方向ともに渋滞の発生はない。9時台に3号線下り三軒茶屋出口付近から混雑が始まり、10時台から12時台に渋滞末尾が大橋JCTまで延伸してきている。その後、13時台から

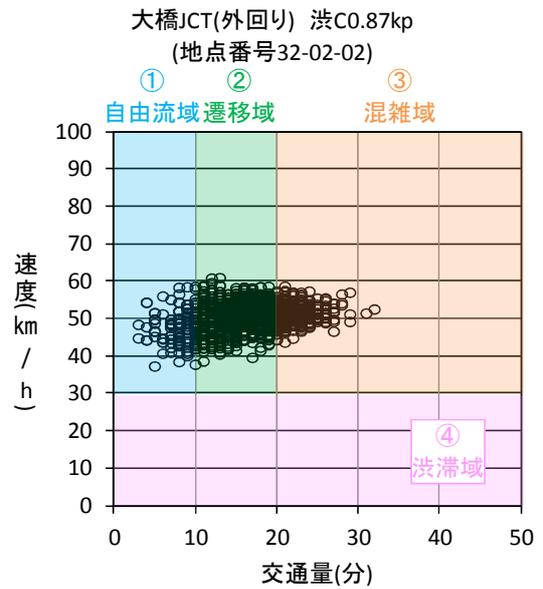


図-6 下り勾配QV図

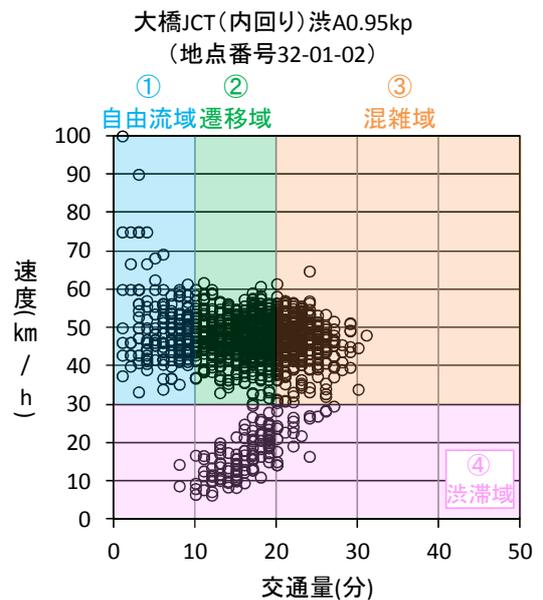


図-7 上り勾配QV図

14時台で渋滞が解消し、16時台までは渋滞は発生せず、夕方の17時台以降に午前中と同様な混雑が始まっている状況であった。調査両日も6月中旬の週の半ばであり、大橋JCT周辺の交通状況としては、年間を通じて一般的な状態と言える。

図-6及び図-7は、大橋JCT内に設置されている超音波式車両感知器から得られた交通量と速度データによるQV図である。データ取得日時は、フローティング調査日時と合わせている。なお、本稿におけるジャンクション内の交通状態は、以下の4種類を定義した。設計速度及び制限速度は、40km/hである。

- ① 自由流域：速度30km/h以上かつ交通量10台/分・車線未滿
- ② 遷移域：速度30km/h以上かつ交通量10台/分・車線以上20台/分・車線未滿
- ③ 混雑域：速度30km/h以上かつ交通量20台/分・車線以上
- ④ 渋滞域：速度30km/h未滿

下り勾配区間を示す図-6からは、多少混雑域はあるが渋滞域はない。

上り勾配区間を示す図-7を見ると、大橋JCT3号線下り方面出口付近で渋滞域が発生していることがわかった。ただし、この現象は、大橋JCTの上り勾配区間そのものの容量低下により発生している渋滞なのか、あるいは、3号線下り三軒茶屋出口付近からの渋滞末尾が延伸してきた影響なのかは、現在のところ把握できていない。

c) 大橋JCT内の幾何構造と走行速度変化の関係

2日間の調査から、142サンプルデータを取得し、明らかに異常データと考えられるものを除外した結果、分析に有効なサンプルデータは、下り勾配区間で64サンプル、上り勾配区間で53サンプル合計117サンプルとなった。

図-8に、大橋JCT下り勾配区間の幾何構造と走行速度・加速度の関係を示す。中段に縦断勾配と標高、平面曲線半径と曲率、横断勾配と合成勾配などの幾何構造を示す。上段に普通車に追従したケースの混雑域、遷移域、自由流域別の平均的な3サンプルの速度変化と加速度変化、下段に大型車に追従したケースの平均的な3サンプルの速度変化と加速度変化を走行距離に対して示す。

図-9は、同様に大橋JCT上り勾配区間について取りまとめたものである。ただし、上り勾配区間の普通車には、渋滞域のサンプルを加えている。

まず、下り勾配区間の普通車は、曲線半径が小さいカーブ手前で減速することで走行速度の上昇を抑えていることがわかる。しかし、減速加速度が2回転して下って行く間に大きくなっているのに対して、走行速度の上昇

大橋JCT: 首都高速3号線(上り)分流→ 中央環状線(外回り)合流

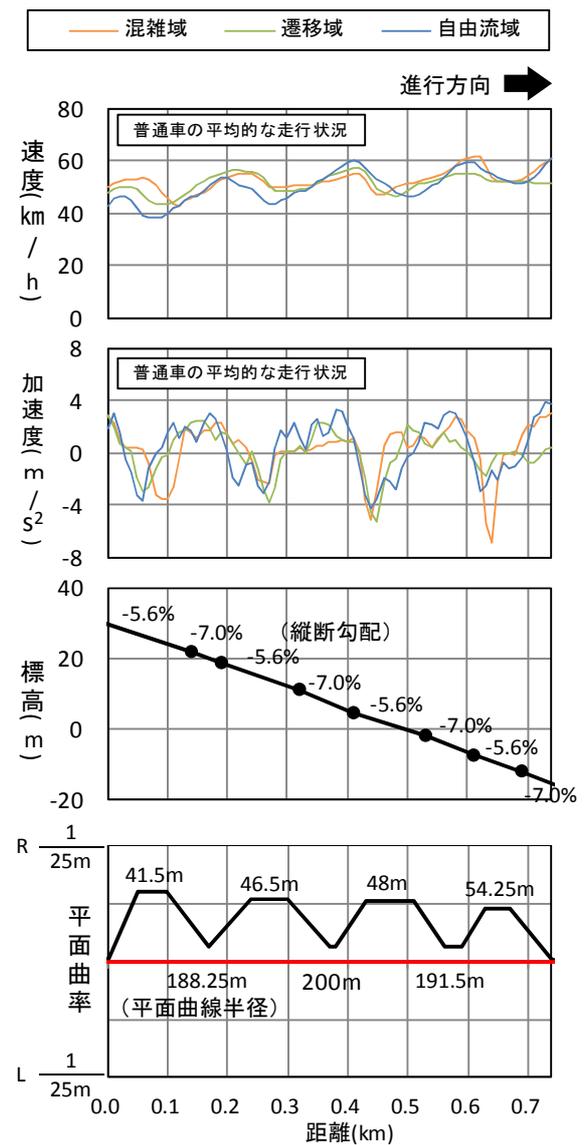


図-8 下り勾配幾何構造と走行速度変化

大橋JCT: 中央環状線(内回り)分流～→
首都高速3号線(下り)合流

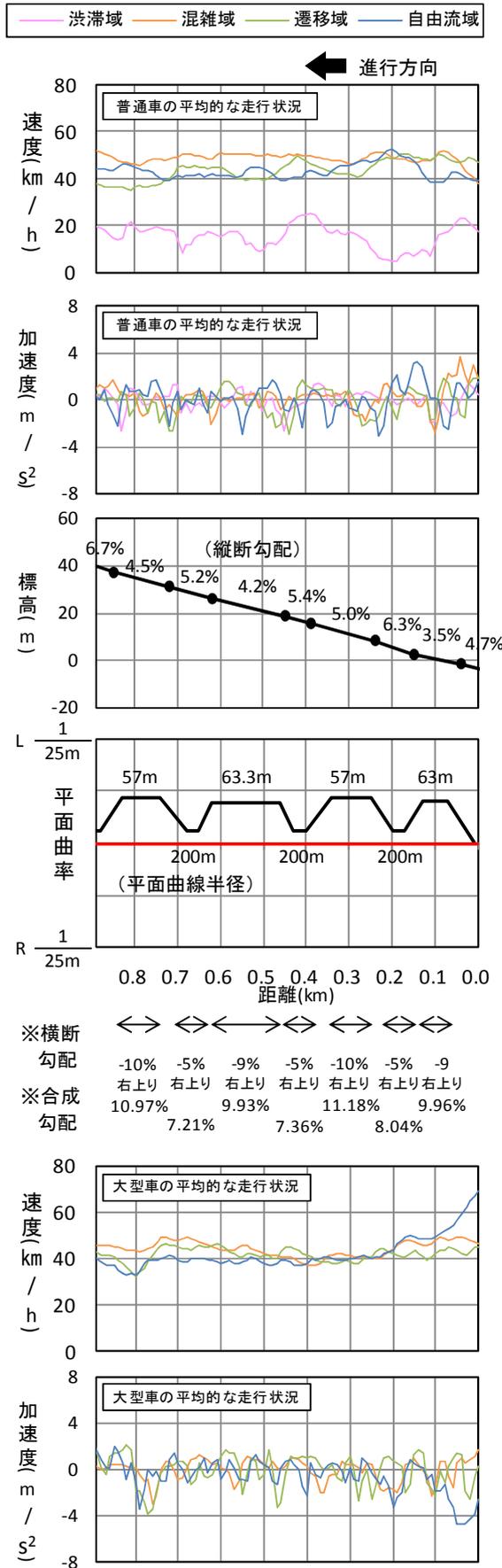


図-9 上り勾配幾何構造と走行速度変化

が抑えきれず、結果としてジャンクション入口部の走行速度よりジャンクション出口の走行速度が大きくなってしている。これは、ドライバーは、視距が短い曲線半径の小さいカーブ手前で頻繁にブレーキを踏みこんでいるが、その先の曲線半径の大きいカーブ区間で縦断勾配がさらに大きいため、ドライバー自身が予測しているカーブ先の加速度より大きな加速が生じたためと考えられる。また、曲線半径が小さいカーブと大きなカーブの縦断線形を短い区間で変化していることが原因とも考えられる。大型車についても同様の傾向は見られるが、普通車に比べて走行速度は低く抑えられており、加速度の変動は少ない。これは、大型車のドライバーは、普通車に比べて大橋JCTの幾何構造の影響をより多く受けるため、車の制御が慎重になっている可能性がある。

これに対して、上り勾配区間の走行速度は、渋滞域を除いてほぼ一定速度が保たれているが、小刻みな加減速度の変化が見られる。これは、幾何構造に関係なく比較的一定の走行速度が保ち易く、上り勾配であるために減速時はブレーキを踏むことなくアクセルのオンオフのみで車両制御されているためではないかと考えられる。ドライバーにとっては、車両制御が容易な分、走行時のストレス負担は少なく済む可能性が高い。渋滞域については、加減速度に他の場合と同様に特徴的な変化は見られないが、走行速度の変化については曲線半径の大小によらず変化していることから、渋滞中の粗密波の影響を受けているものと考えられる。大型車も、普通車と同様の走行速度の増減、加速度の増減を繰り返しており、大橋JCTの道路線形の影響は少ないように思われる。大型車については車両重量及び積載荷重が大きく、カーブを通過する際の走行軌跡も大回りしなければいけないため、ジャンクション最上部で走行速度低下の発生を予想していたが、そのような結果にはなっていない。最近の大型車は自動車自体の運動性能が高くなったことにより、急勾配の縦断線形が長く続く上り坂でも、それほど速度は低下しない可能性がある。ただし、フローティング調査によるサンプル大型車がたまたま空積載であった可能性もある。したがって、満積載の大型車が大橋JCT内の急勾配で大きく速度低下することが渋滞原因となる可能性を排除するものではない。

(4) 大橋JCT内の事故発生状況

首都高速道路は、一般街路に比較して死傷事故率が低く、死傷事故率は一般街路の約1/10となっている。一般街路との比較はできないが、首都高速道路全線の車両の追突、施設接触、車両接触、横転転覆等の車両事故率は、約140件/億台キロ・年である。この車両事故の約7割は、ジャンクション合流部、カーブ区間、織込み区間で発生している。

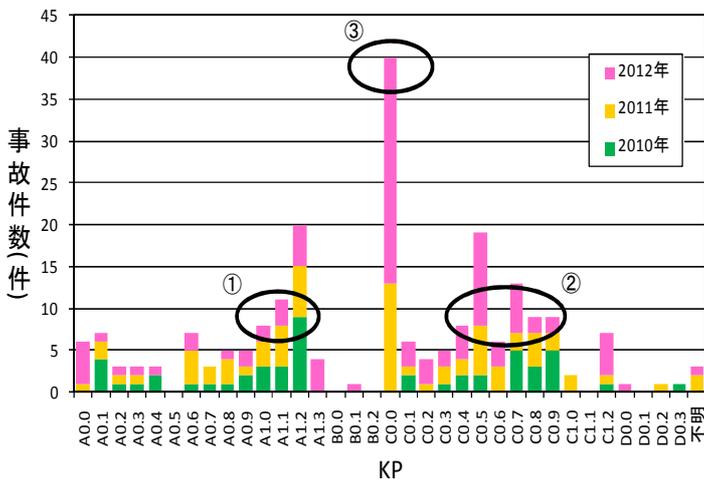


図-10 大橋JCT内キロポスト別事故発生箇所図

大橋JCTの車両事故率は、約210件/億台キロ・年であり、首都高速道路全線と大橋JCT内の車両事故率を比較すると、大橋JCTの方が約1.5倍事故率が高くなっている。以下に大橋JCT内の事故の特徴を述べる。

a) 主な事故発生地点

図-10は、大橋JCT開通後3年間の車両事故件数をキロポスト別に示している。これによると、大きく分けて以下の3地点で事故が多発している傾向がある。

- ① 大橋JCT上り勾配3号線下り合流前渡線左カーブ
- ② 大橋JCT下り勾配第一右カーブ～第二右カーブ
- ③ 大橋JCT下り勾配山手トンネル本線流入前渡線最終出口（1車線から2車線への変更区間）

b) 各区間の事故の主な特徴

① 3号線下り三軒茶屋出口付近からの渋滞が、大橋JCTの渡線区間まで延伸してきた結果、渡線の左カーブとクレスト区間の設計速度上の視距が、高い実勢速度に対する見通しに対応できないことにより、いわゆるブラインドカーブとなり、左カーブ先の渋滞末尾の車に衝突している。

② 3号線上りと3号線下りから大橋JCTに流入してきた大型車（貨物系）が大橋JCT内で合流後、最小曲線半径約50mの第一右カーブを過ぎた後、約200mの緩い曲線半径区間で加速し、次の最小曲線半径の第二右カーブで横転している。

この横転事故の原因として、重心位置が高い大型車のカーブ進入速度が十分に減速できなかったため、カーブ進行中の横方向Gが卓越し、車両制御不能となっている可能性が考えられる。

③ 上記②の区間を走行した後、大橋JCT内下り勾配を2回転し山手トンネル本線に加速しつづ

た車群が、1車線から2車線に広がる付近で、さらに加速しながら右車線に車線変更する車と定速走行する車などが輻輳して車両接触が発生している。

(5) 大橋JCT内走行ドライバー（経験者）の意識

大橋JCTで実施されている色による案内誘導やカウントダウン標識などの走行支援策の効果・評価を目的として、平成22年3月の大橋JCT開通2か月後及び6か月後にPAで、3か月後にWEB及び首都高モニターに対してそれぞれアンケート調査を行った。PAでは153サンプル、WEBは500サンプル、首都高モニターは118サンプル、合計771サンプルが得られた。得られた回答の中で、特徴的なものを以下に示す。

- ① カラー舗装やカラー看板などの色による走行支援策は、わかり易く、走りづらい点はない。
- ② 約6割のドライバーは、大橋JCTが楕円だと気付いていない。
- ③ 走行中気をつけた点は、「前方車両との車間」、「速度の出しすぎ」、「カーブ先の状況」及び「車線からはみ出し」となっている。
- ④ 約3割の人がヒヤリ体験をしている。

大橋JCTが長円と短円の組み合わせである楕円形に気が付かないほど、走行中のドライバーは、緊張感を持って運転に集中している可能性がある。

(6) アイカメラ試験走行データからの考察

大橋JCT開通6か月後にアイカメラをプロドライバー1名、一般3名（上級者1名、普通2名）のそれぞれに装着し、各被験者は、大橋JCTを中心に上り勾配区間、下り勾配区間を2回～4回の走行をした。アイマークレコーダは、(株)mac社製のモバイル型アイマークレコーダEMR-9を使用した。幾何構造別に注視点の比較を行うために、大橋JCT内部と直線部の区間別に注視点データを整理する。また、被験者にはループ内走行中に車線変更をするように指示し、注視点の特性を把握している。アイカメラの注視点の読み取りは、1/30秒ピッチとしている。以下に幾何構造別に注視点の特性を比較した結果を示す。なお、これに関連する調査・研究として、増田ら^{2), 3)}によって別途報告されている。

a) 大橋JCTと直線部の比較：

直線部での注視点分布と比較すると、大橋JCT内は周辺を見る余裕がなく、安全に運転するために前方路面及び前方車両を多く注視している状況である。

b) 大橋JCTの上り勾配と下り勾配の比較：

上り勾配は、個人によって注視点にばらつきがあるが、スピードメータや看板等周辺や進行方向を見て

いる割合が多いため、比較的運転環境に余裕があると考えられる。

下り勾配は、周辺を見ている割合が少ないため、運転環境に余裕がないと考えられる。

大橋JCT走行時は、前記の意識調査と同様に、各ドライバーの属性にかかわらず、一般的な直線部を運転するときよりも、周囲に対する視線を配る余裕がなく前方路面や前方車両に集中していることがアイカメラのデータからも明らかになった。また、その傾向は、特に下り勾配で顕著であることが判明した。

3. らせん状JCT内の走行性能に係る影響要因

(1) 各種調査結果から要因の抽出へ

今回初めてらせん状ジャンクションの代表例である大橋JCTの走行速度データ等を調査し、整理・分析を試みたが、その結果、幾何構造が走行時のドライバーに与えている影響は少なからず存在し、交通安全上、多数の事故は顕在化していないが、快適性を追求する上で修正すべき幾何構造要素が存在する可能性がある。このことから、ドライバーは、閉塞されたらせん状のループを運転する際、ブレーキとアクセルを細かく制御することで、実は横方向Gを一定に保とうとしているのではないかと考えられる。そこで、現在の幾何構造の設計時に考慮されていない新たな要素として、ジャンクション走行時の速度変化とカーブ通過時の横方向G一定化の分析にフォーカスしていきたいと考えている。

それらを踏まえた上で今後、らせん状ジャンクションの幾何構造と走行性能に与える影響要因を明らかにする場合、以下の要因を考慮して研究を進めていきたいと考えている。

- a) 回転角による違い
- b) 合成勾配の空間変化
- c) 視距/見通し距離の空間変化、側方余裕
- d) 車線変更/織込み挙動
- e) 大型車混入率

上記a)～e)の項目別に幾何構造と交通流現象をリンクさせることと同時に、走行時のドライバー心理に与える影響要因を幾何構造面からも考察していきたいと考えている。

4. おわりに

本研究は、大橋JCTの様な密集市街地で高低差のある路線同士を接続しなければならないような状況にある場合、既

存の市街地の環境をいかに損なわないように保全しながら、ジャンクションを走行するドライバーの快適性を確保するかという相反する命題を解決するための一つの答えがコンパクトならせん状ジャンクションであることを証明したいと考えている。らせん状ジャンクションを安全かつ快適に走行するためには、幾何構造、交通流現象及びドライバーの心理という3要素の関連性を明確にし、その結果を計画、設計、管理運営などの実務に反映するとともに、ドライバーへの情報共有を行いながら、啓発活動にも力をそそがなければならない。

現在、大橋JCTが開通して3年が経過しているが、大橋JCTを利用するドライバーもある程度習熟化してきており、したがって、交通流現象も定常化してきていると考えられる。2年後には品川線が接続し、4枝ジャンクションになるため、大橋JCTが持つ性能をフルに発揮できる時期が来ることになる。現在は、3枝ジャンクションとしての交通現象のみの分析となるが、品川線が接続後の4枝ジャンクションになった場合、ループ内の織込み交通による影響を加えた分析を試みることにより、らせん状ジャンクションの適性化を解明し、新しいタイプのジャンクションとして体系化していきたい。また、すでに長期間運用している加平ランプ、大黒ジャンクション等の他のらせん状ジャンクションとの比較分析を実施することで、コンパクトジャンクションの幾何構造に対するスタンダライゼーションを確立していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 田沢誠也、竹鼻淳志、須長順行、後藤秀典：大橋ジャンクションにおける走行支援策の検討、第30回交通工学研究発表会論文集、2010
- 2) 田中翔太、岡野孝司、増田智志、田中淳、後藤秀典、小野晋太郎、三嶋博之：大橋ジャンクションにおけるアイカメラを用いた走行実験とドライバーの視環境に関する研究、第9回ITSシンポジウム、2010
- 3) 増田智志、橋剛志、後藤秀典、梅田祥吾：アイマーカーレコーダを用いた大橋ジャンクションにおけるドライビングシミュレータの再現性検証、第44回土木計画学研究発表会論文集、2011
- 4) 首都高速道路(株)東京建設局調査・環境グループ、(株)オリエンタルコンサルタンツ：大橋ジャンクション部走行支援検討、2009
- 5) 首都高速道路(株)東京建設局調査・環境グループ、(株)オリエンタルコンサルタンツ：中央環状線交通円滑化および防災安全に関するシステム検討、2011
- 6) 首都高速道路(株)保全・交通部交通安全推進課、(株)オリエンタルコンサルタンツ：交通事故集計解析及び安全対策検討他(平成24年度)、2013
- 7) 首都高速道路(株)建設事業部国際企画課、(株)道路計画：海外におけるコンパクトJCTの計画設計資料作成、2013

(2013.8.2 受付)

STUDY ON THE RELATIONSHIP BETWEEN TRAFFIC FLOATING DATA AND STRUCTURE GEOMETRY OF SPARAL JUNCTION

Seiya TAZAWA, Takashi OGUCHI and Hirohisa MORITA

Recently, construction projects of junction in urban area are facing various restrictions and challenges such as land acquisition and environmental concern. Ohashi junction is one of the successful cases to solve these issues adopting innovative ideas. While minimizing its construction area and environmental influence for local residents, the structure of Ohashi junction can be stressful and risky for drivers. The reason is that these drivers are forced to choose the right destination quickly circling around the closed and narrow spiral with elevated structure.

The main purpose of this study is to reduce such drivers' stress by analyzing the relationship between the characteristics of traffic floating and the geometric structure in Ohashi junction. In this article, a floating research is implemented grasping the traffic situation in Ohashi junction for the purpose of examination to reveal correlation between geometric structure and driving speed. It would be beneficial if the result of this study could be a milestone for the planning and designing of cutting-edged urban compact junctions in the future.