

大深度地下高速道路の JCT における車両および運転者の挙動の把握

Characteristic of Vehicle and Driver Behavior at Junctions of Deep Underground Expressways

飯田 克弘¹, 遠藤 貴樹², 多田 昌裕³, 蓮花 一己⁴, 山本 隆⁵, 中村 丈彦⁶, 糸島 史浩⁷

Katsuhiro IIDA¹, Takaki ENDO², Masahiro TADA³, Kazumi RENGE⁴, Takashi YAMAMOTO⁵, Takehiko NAKAMURA⁶ and Fumihiro ITOSHIMA⁷

地上や浅い地下の利用が高度化・複雑化した大都市圏では、交通ネットワークの整備のため、大深度地下を使用した高速道路の整備が進展している。大深度地下高速道路の JCT では、空間的制約、整備目的から派生して、地上-地下間の急勾配、ランプトンネル内の分合流部およびランプの急カーブなど、道路形状の急激な変化が短い区間に集中する場合があるが、このような道路構造が車両や運転者に与える影響は把握されていない。本研究では、ドライビング・シミュレータによる室内走行実験により、大深度地下高速道路の JCT における車両および運転者の挙動を調査した。その結果、標準的な安全対策である表示板の効果とデザイン改善の必要性が伺えた。さらに、速度が急低下する箇所や追突事故リスクが高い箇所を確認でき、その要因の把握を試みた。

In the large metropolitan areas, usage of grounds and shallow undergrounds are becoming more sophisticated and complicated. Therefore, the construction of the expressway using the deep underground is progressing to improve the transportation network. At the junctions of deep underground expressways, from the aforementioned reasons, there are cases where sudden changes in the road shape are concentrated in relatively short sections such as steep slopes from above grounds to under grounds, split or merge points of the rump tunnels, and sharp curves of the ramps. However, the impact of changes in road structures, usage of deep underground, on vehicles and drivers is not understood properly. In this study, by an indoor driving experiment using the driving simulator, we investigated the behavior of vehicles and drivers at junctions of deep underground expressways. As a result, we confirmed the necessity of attracting attention, which is a standard safety measure. Additionally, we clarified where the risk of rear-end accident is high and tried to grasp the factor.

Keywords: 大深度地下高速道路, ジャンクション, ドライビング・シミュレータ, 運転者挙動
Deep Underground Expressway, Junction, Driving Simulator, Driver Behavior

1. はじめに

近年、日本の大都市圏では、都心への交通集中に加え、通過交通の流入により慢性的に渋滞が発生している。この渋滞を解消するために、都心部を迂回する大規模な高

速道路の整備が求められている。

しかし、土地利用の高度化・複雑化が進んでいる大都市圏では、地上や浅い地下を使用した効率的な事業の遂行は難しい傾向にある。そのような中、「大深度地下の公

-
- 1 正会員, 博士 (工学), 大阪大学大学院工学研究科
Member, Dr. Eng, Graduate School of Engineering, Osaka University
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1 e-mail: iida@civil.eng.osaka-u.ac.jp Phone: 06-6879-7611
 - 2 学生会員, 学士 (工学), 大阪大学大学院工学研究科
Student Member, Graduate School of Engineering, Osaka University
 - 3 正会員, 博士 (工学), 近畿大学理工学部
Member, Dr. Eng, Faculty of Science and Engineering, Kindai University
 - 4 正会員, 博士 (人間科学), 帝塚山大学大学院心理科学研究科
Member, Dr. Human Science, Graduate School of Psychological Sciences, Tezukayama University
 - 5 正会員, 修士 (工学), 中日本高速道路株式会社
Member, ME, Central Nippon Expressway Company Limited
 - 6 非会員, 学士 (工学), 中日本高速道路株式会社
Non-member, Central Nippon Expressway Company Limited
 - 7 非会員, 学士 (工学), 株式会社 高速道路総合技術研究所
Non-member, Nippon Expressway Research Institute Company Limited

共的使用に関する特別措置法」が施行され、一定の条件を満たした事業であれば、事前の補償を行うことなく大深度地下に使用権を設定することが可能となった。これを受けて、大深度地下を使用した高速道路の整備が進展しており、2014年には、道路として初めて、東京外かく環状道路（関越～東名）（以下、東京外環）に大深度地下の使用が認可され、現在工事が進められている。

このような大深度地下高速道路には、地上の道路との接合点が必要であるが、その役割を担うジャンクション（JCT）およびランプは、上述の通り、土地利用や権利の複雑化した地上や浅い地下に建設しなければならず、空間的な制約を受ける。つまり、限られた範囲で深い地下と地上を繋ぐため、ランプは必然的に急勾配となり、既存道路との接続には急なカーブが必要となる場合がある。また、ネットワーク性を確保するため、トンネル内に分合流が存在する場合もあり、その分合流をはじめとして、急激な断面変化が生じることもある。

たとえば、トンネル進入部では道路幅員の縮小や明暗差、視環境などがドライバーの行動に心理的な影響を与え、走行車両の速度が低下し、渋滞が発生するという指摘¹⁾から推察できるように、急激な断面変化によって車両速度が低下し、渋滞が発生する可能性がある。また、縦断勾配が相対的に上りとなる区間では、無意識の速度低下によって渋滞が発生しやすく、トンネルではより速度低下に気づきにくいという指摘²⁾からも、渋滞の発生が懸念される。さらに、急カーブや分合流部での事故発生リスクは高いことが指摘されている³⁾。

しかし、トンネル内の視環境は、明かり部と異なり、明かり部を対象とした研究で得られた知見の直接的な適

用は難しい。また、トンネル内では空間的制約により、明かり部で実施できた対策が施せないことも多い。東京外環では、たとえば、急激な断面変化を伴って、本線から急勾配ランプに進入、続いて分岐、その後にカーブといったように、道路形状変化が短い区間に連続して発生する。

このような道路構造はこれまでに存在せず、車両や運転者の挙動に与える影響は把握されていない。この影響を把握することは、東京外環のみならず、今後建設される大深度地下高速道路全てに対し有用な知見となる。

以上を踏まえ、本研究では、大深度地下高速道路本線から地上の高速道路本線へと向かうランプを含むJCTを仮想空間上で再現し、ドライビング・シミュレータ（以下、DS）を用いた室内走行実験を行うことにより、大深度地下高速道路のJCTにおける車両および運転者の挙動を把握することを目的とした。

2. 室内走行実験

2.1 実験概要

本研究では、2017年11月16日から同30日のうち平日の10日間、1日あたり4名の計40名の被験者に対し実験を行った。被験者として、日常的に運転する33～50歳の男性40名（平均42.3歳）を一般募集した。

2.2 実験手法

本研究では、東京外環の中央JCTのFランプ（東京外環北行きから中央自動車道下り線へ向かうランプ）周辺を再現した道路モデル（図1）を使用し、走行実験を行

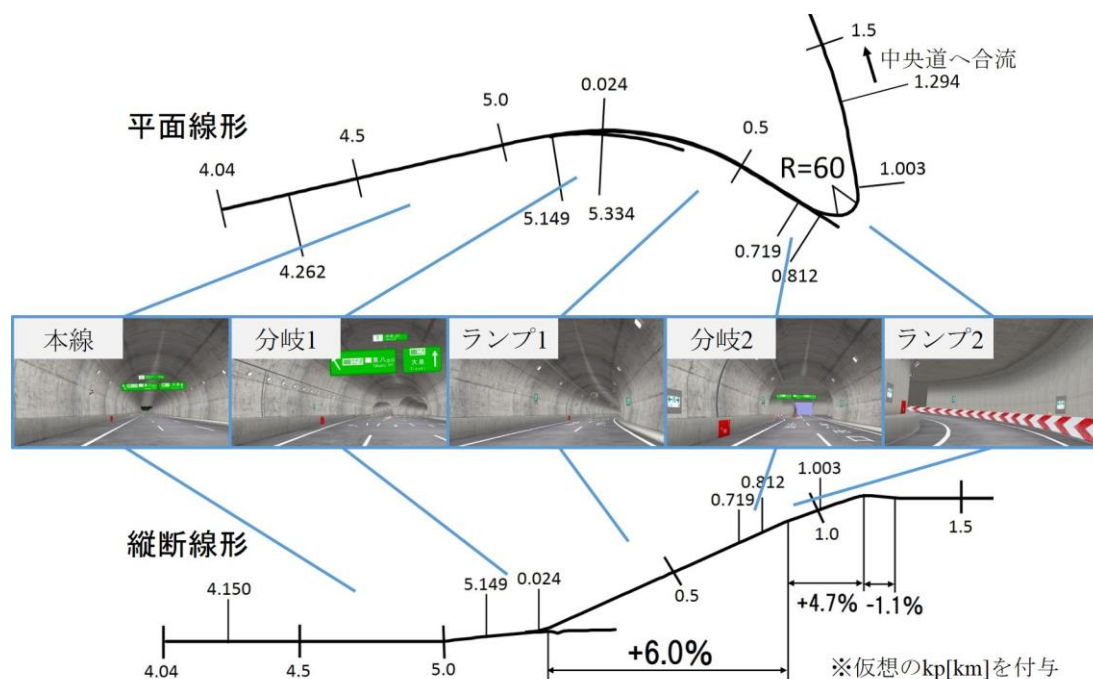


図1 東京外環中央JCT・Fランプの道路線形図

った。この道路モデルは、東京外環本線の3車線トンネルと本線から分岐する2車線ランプ、2車線ランプから分岐し中央道本線へと合流する1車線ランプ、中央道本線で構成されている。データを取得するための走行は、被験者につきそれぞれ3回実施した。まず、周辺車両のいない単独走行実験（以下、走行1）を行った。次に、東京外環本線の第2走行車線および追越車線、第1走行車線の自車両後方に車群が配置された条件での走行実験（以下、走行2）を行った。さらに、走行2と同様の周辺車両条件での追従積重ね実験⁴⁾（以下、走行3）を実施した。追従積重ね実験とは、ある被験者が走行する際に、先行被験者全ての走行記録に基づく車両が前方に描写され、被験者はそれらに追従して走行する実験である。

また、被験者を、運転頻度にばらつきが出ないように、グループa（20名、平均運転頻度17回/月、平均42.5歳）とグループb（20名、平均運転頻度18回/月、平均42.1歳）に分け、グループaの被験者には、急な速度低下や速度超過に対する標準的な安全対策である注意喚起の表示板（2.4で後述。以下、表示板）が設置されていない道路モデルを使用し、グループbの被験者には表示板の設置された道路モデルを使用し、実験を行った。

この際、DSにより車両挙動データを取得し、視線を計測する装置（ナックイメージテクノロジー社製アイマークレコーダー EMR-9。以下、EMR）により視線データ、心電と呼吸を計測する装置（キッセイコムテック社製マルチセンサー生理指標計測システム NeXus-10、ディスプレイ電極およびグラウンド、呼吸計測用バンド。以下、生理指標計測装置）により心電と呼吸のデータを取得した。また、各走行後には、ヒアリングによりヒアリングデータを取得した。取得データの詳細は2.7で後述する。

2.3 DS システム

本実験で使用するDSは、PCおよび液晶プロジェクタ、多画面スクリーン、模擬運転台、音響装置から構成される（図2）。多画面スクリーンは、正面が120inch、左右が150inchのスクリーンから構成されており、対応するプロジェクタから前景、左景、右景の映像が投影される。さらに、模擬運転台には、左右サイドミラーおよびルームミラーの役割を果たす液晶ディスプレイが設置されており、後方風景の映像が映し出される。

ドライバーの操作、すなわちハンドルおよびアクセル、ブレーキの使用量は、運転台により分解能1°（ハンドルは左右それぞれ160°、アクセル・ブレーキは22°が最大値）で検出され、1/66秒のフレームレートでPCへと送信される。このアクセル・ブレーキの使用量に基づき計算される加速度に、車両の走行地点における縦断勾配や空気抵抗、コーナリング抵抗による加速度を加えることにより、車両の加速度が算出される。

そして、これらの入力情報から、PCにより車両の速度、位置、進行方向が決定され、これに応じた映像が映し出され、走行音が模擬運転台のスピーカーより再生される。このシステムは、飯田らにより、トンネル坑口付近での走行速度や心拍数、注視率において再現性が高く⁵⁾、-3.2%から+3.7%の勾配変化のサグ部を含む区間において追従挙動を良好に再現する⁶⁾ことなどが確認されている。

なお、本実験では、車両は普通乗用車を想定し、路面からの視点高さを1.1mとしている。

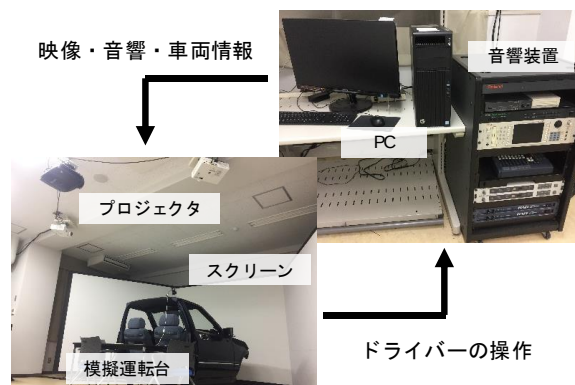


図2 DSシステムの構成

2.4 道路モデルと分析区間

実験で使用した道路モデルのうち、図1および表1に示すように、東京外環本線の一部（以下、本線）、東京外環本線から2車線ランプへの分岐部（以下、分岐1）、2車線ランプの一部（以下、ランプ1）、ランプ1終端から続く分岐部（以下、分岐2）、分岐2後の1車線ランプの一部（以下、ランプ2）の5つの区間を分析区間とした。

表1 分析区間

区間名	区間 (kp)	構造要素	設計速度
本線	4.262～5.149	大トンネル	80km/h
分岐1	5.149～0.024	断面変化	80km/h
ランプ1	0.024～0.719	急勾配	40km/h
分岐2	0.719～0.812	分岐	40km/h
ランプ2	0.812～1.003	急カーブ	40km/h

また、表示板として、ランプ1には、標準的な安全対策である急勾配への注意を喚起する2枚1組の表示板（図3）を2組、計4枚を、ランプの始端から1枚ずつ50m間隔（0.010kp～0.160kp）で用意し、急カーブの存在を示す表示板（図4）2組、計4枚を、ランプ終端に向け1枚ずつ50m間隔（0.547kp～0.697kp）で用意した。さらに、分岐2の分岐端には、分岐およびカーブの線形を示す分岐部表示板（図5）を1枚用意した。

なお、表示板のサイズは、対象区間の構造に応じた、設計要領の範囲で掲出可能な最大のものとしている。

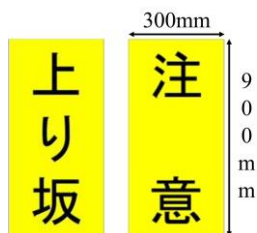


図3 表示板(急勾配)

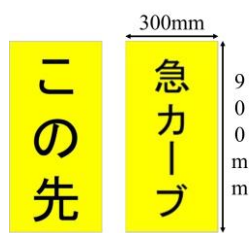


図4 表示板(急カーブ)

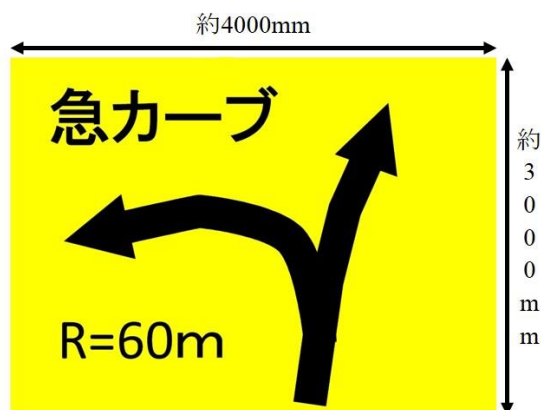


図5 分岐部表示板

2.5 走行条件

(1) 走行開始時の条件

走行開始位置は東京外環本線の第1走行車線、4.04kpとした。また、走行開始時の速度は、走行1および走行2については80km/h、走行3については前方車両の速度とした。さらに、走行3では、密な交通流の形成をねらいとして、既往研究⁷⁾を参考に、走行開始時の前方車両との車頭時間を2秒とした。

(2) 走行車線

東京外環本線では、走行車線を第1走行車線に限定した。また、走行3に関しては、分岐1から分岐2までについても左側の車線に走行車線を限定した。経路選択の迷いや、行き先が異なる車両の錯綜なども考慮すべきであるが、今回は主に構造的要因が車両や運転者に与える影響を調べることが目的のため、このように限定した。

(3) 先頭車群

走行3において、各グループの最初の被験者も追従条件での走行とするために、先頭車両を含む4台の車両軌跡(以下、先頭車群)を、予め筆者らが表1に示した設計速度を目安に走行し、作成した。この4台のうち、2台はランプ1で左側の車線を走行し、中央道へ向かう車両とした。また、もう2台はランプ1で右側の車線を走行し、ランプを直進していく車両とした。これら2種類の車両を1台ずつ交互に積重ね、先頭車群とした。各グループの最初の被験者は、この先頭車群への追従走行となる。

2.6 実験手順

はじめに、被験者に実験に関する注意事項や個人情報の取り扱いについての説明を行い、同意書に記名押印してもらった。その後、DSの操作方法や走行するコースについての説明を行った。

次に、生理指標計測装置を装着した後、DSの運転操作やトンネル内での運転感覚に慣れてもらうため、新東名高速道路下り線の新清水ICから新清水JCT周辺を再現した道路モデルを用いて、練習走行を2回行った。1回目は実験者から指示をしながらの走行で、2回目は被験者に自由に走行させた。また、このとき普段運転している車両と比較して、走行音量に違和感があれば調整した。さらに、R=60mのカーブでの運転操作や感覚に慣れてもらうため、大山崎JCTの名神高速道路下り線から京滋バイパス上り線へ向かうランプ周辺を再現した道路モデルを用いて、練習走行を行った。このとき、カーブでの運転操作に違和感があれば、もう一度走行させた。ハンドルやアクセル・ブレーキのパラメータの調整は行わず、被験者が操作に慣れたことを確認してから本番走行を行った。

その後、EMRを装着し、走行1～走行3を実施した。走行の際には、走行速度の目安として本線では制限速度が80km/hとなっており、ランプでは標示板や情報板が参考に出来ること、および、壁や周辺車両に接触した場合もしくは道順を間違えた場合には、走行やり直しとなることを教示した。また、上記2点以外は、普段どおりの運転を心がけることも教示した。

各走行後には、その走行に関するヒアリングを行った。

2.7 取得データ

(1) 車両挙動データ

走行開始からの経過時間[s]、走行車線、走行地点(kp)[km]、速度[km/h]、加速度[m/s²]、アクセル・ブレーキ使用量[%](ペダルを放しているとき0%、ペダルを完全に踏み込んだとき100%)、車両中心の位置(xyz座標)、前方車両との車間距離[m]を、0.1秒ごとのデータとして、DSにより記録した。

また、分析の際には、これらを線形補間により変換した0.001kpごとのデータを使用した。

(2) 運転者挙動データ

EMRにより視線座標データを取得し、注視対象物と、その注視時間を算出した。なお、既往研究⁸⁾を参考にし、注視とは、視線停留時間0.165秒以上、眼球移動速度10deg/s以下とした。また、生理指標計測装置により走行中の心電と呼吸のデータを取得し、安静時の心電を計測するため、練習走行前に安静座位心拍を記録した。

(3) ヒアリングデータ

まず、グループa・bに共通の質問項目を10個用意し

た(表2)．この質問項目のうち、表3に示す項目について、各走行後に分析区間ごとに回答してもらった．

さらに、グループbの被験者には、走行2の後に、表示板に関する質問(表4)を各表示板について行った．

表2 グループa・bに共通の質問項目・内容

質問項目	質問内容
注意度	どのくらい気をつけて運転していたか(7段階評価) (1:全く気をつけていなかった, 7:とても気をつけていた)
注意対象	特に気をつけていたこと(自由回答) (注意度1を選んだ場合, その理由)
不安度	どのくらい不安を感じたか(7段階評価) (1:全く感じなかった, 7:とても感じた)
不安理由	不安度の選択理由(自由回答)
体感速度	何km/hで走行していたか(自由回答)
体感速度差	メーターの速度と体感速度の差(7段階評価) (1:メーターの速度のほうがとても速かった, 4:差はなかった, 7:体感速度のほうがとても速かった)
カーブ予測可否	先のカーブのきつさを予測できていたか
カーブ予測位置	きつさを予測できていなかった場合, 予想と違うと気づいたのは, ランプ2進入前か, 進入後か
カーブ難易度	カーブを曲がるのがどのくらい難しいと感じたか(7段階評価) (1:全く難しくなかった, 7:とても難しかった)
難易度理由	カーブ難易度の選択理由(自由回答)

表3 走行および分析区間ごとの質問項目

	走行1	走行2	走行3
本線	注意度 注意対象 不安度 不安理由 体感速度 体感速度差	注意度 注意対象 不安度 不安理由	注意度 注意対象 不安度 不安理由 体感速度 体感速度差
分岐1	注意度 注意対象 不安度 不安理由	注意度 注意対象 不安度 不安理由	注意度 注意対象 不安度 不安理由
ランプ1	注意度 注意対象 不安度 不安理由 体感速度 体感速度差	注意度 注意対象 不安度 不安理由	注意度 注意対象 不安度 不安理由 体感速度 体感速度差
分岐2	注意度 注意対象 不安度 不安理由 カーブ予測可否 カーブ予測位置	注意度 注意対象 不安度 不安理由	注意度 注意対象 不安度 不安理由
ランプ2	注意度 注意対象 不安度 不安理由 体感速度 体感速度差 カーブ難易度 カーブ難易度理由	注意度 注意対象 不安度 不安理由 カーブ難易度 カーブ難易度理由	注意度 注意対象 不安度 不安理由 体感速度 体感速度差 カーブ難易度 カーブ難易度理由

表4 グループb限定の質問項目・内容

質問項目	質問内容
表示板認知	表示板に気づいていたか
表示板内容	表示板に気づいていた場合, どのような内容が書かれていたか(自由回答)
表示板注意度	表示板に気づいていた場合, 表示板によってどのくらい気をつけようと思ったか(7段階評価) (1:全く気をつけようと思わなかった, 7:とても気をつけようと思った)

3. 標準的な安全対策の効果の検討

本章では、表示板の有無による車両および運転者の挙

動の差を、グループaとグループbの走行1について分析区間ごとに比較し、表れた差の要因を考察した．

3.1 分析区間ごとの比較

車両挙動データについては、表示板(急勾配)と表示板(急カーブ)それぞれの影響を分離するため、分析区間のうちランプ1はランプ1前半(0.024kp〜0.372kp)とランプ1後半(0.372kp〜0.719kp)に分け、区間ごとに、グループ間で母平均に差があるかを推定した．ヒアリングデータについては、区間をこれ以上分けることができないため、分析区間ごとに、グループ間で母平均に差があるかを推定した．具体的には、母分散の差の検定(F検定, $\alpha=0.05$)を行い、有意差がなければStudentのt検定、有意差があればWelchのt検定で母平均の差の検定を行った．

(1)車両挙動データの比較

表示板による効果として、被験者に注意を促し、過度または過少なアクセルの使用を抑制する効果、つまり、速度の出しすぎや急減速を抑える効果が期待される．そのため、0.001kpごとのデータを用いて、区間ごとのアクセルの平均使用量、平均速度および最大減速度について比較した．グループごとの被験者平均と標準偏差を表5に示す．

検定の結果、ランプ2においてグループbはグループaよりアクセルの平均使用量が有意に大きく、最大減速度が有意に小さいという結果が得られた($p<0.05$)．一方で、その他のデータには有意差は認められなかった．また、全てのデータにおいて、F検定で有意差は認められず、被験者間のばらつきを抑制するような効果は認められなかった．

表5 車両挙動データの被験者平均と標準偏差

グループa	区間	本線	分岐1	ランプ1 前半	ランプ1 後半	分岐2	ランプ2
アクセルの 区間平均 使用量[%]	ave	33.6	31.1	32.2	37.0	23.7	24.9
	sd	5.61	6.12	7.69	5.36	7.51	4.88
区間平均 速度[km/h]	ave	89.003	86.398	71.945	69.372	59.248	47.843
	sd	10.326	10.408	15.110	15.511	13.094	9.157
区間最大 減速度[m/s ²]	ave	0.536	0.640	0.970	1.075	1.226	1.244
	sd	0.546	0.715	0.643	0.798	0.816	0.662
グループb	区間	本線	分岐1	ランプ1 前半	ランプ1 後半	分岐2	ランプ2
アクセルの 区間平均 使用量[%]	ave	30.8	31.7	32.1	36.0	25.2	27.7
	sd	4.02	6.62	8.24	5.44	9.59	3.74
区間平均 速度[km/h]	ave	84.478	83.449	70.553	66.857	58.325	50.195
	sd	6.581	8.056	15.882	17.131	12.315	9.887
区間最大 減速度[m/s ²]	ave	0.391	0.598	0.847	0.954	1.044	0.836
	sd	0.403	0.574	0.590	0.801	0.812	0.564

※赤字は有意差有り

(2)ヒアリングデータの比較

次に、ヒアリングデータのうち、全区間で取得している注意度と不安度について比較を行った．グループごとの被験者平均と標準偏差を表6に示す．

この結果、注意度と不安度には、有意差は認められなかった。また、注意度と不安度においても、F 検定で有意差は認められず、被験者間のばらつきに影響するような効果は認められなかった。

表6 注意度・不安度の被験者平均と標準偏差

グループa	区間	本線	分岐1	ランプ1	分岐2	ランプ2
注意度	ave	4.0	5.6	3.9	5.5	5.3
	sd	1.6	1.1	1.5	1.4	1.0
不安度	ave	2.1	3.9	2.9	5.0	4.9
	sd	1.3	1.6	1.7	1.7	1.6
グループb	区間	本線	分岐1	ランプ1	分岐2	ランプ2
注意度	ave	4.5	5.5	3.7	5.3	5.7
	sd	1.4	1.4	1.8	1.5	1.2
不安度	ave	2.7	4.1	2.6	4.6	4.4
	sd	1.9	1.9	1.8	1.6	1.9

3.2 表示板による差の要因の考察

前節では、グループaよりグループbのほうが、ランプ2でのアクセル使用量が大きく、最大減速度が小さいという結果が認められた。ランプ2にはグループ間で構造上の差は全く無いため、前節で示した差はランプ2の手前の分岐部表示板の存在によって生じた可能性、つまり、表示板により、注意を促されたことや先のカーブ線形を予測できたことにより、早めに減速し始め、徐々に減速でき、カーブでの減速度が弱まった可能性が考えられる。

そこで、まず、分岐2で先のカーブのきつさを予測できていたと答えた被験者の割合(以下、カーブ予測割合)と、2.7(3)で示したカーブ難易度について比較した。具体的には、カーブ予測割合については母比率の差の検定を χ^2 検定で行い、カーブ難易度については前節と同様に母平均の差の検定を行った。

その結果、カーブ予測割合はグループaが30.0%、グループbが40.0%で有意差は認められなかった。また、カーブ難易度についても、被験者平均がグループaは3.90、グループbが3.65と有意な差は認められなかった。

一方、分岐2の注意対象のヒアリング時に、注意対象もしくは注意した理由の1つとして分岐部表示板を挙げていた被験者が、グループbの20名中6名いた(表7)。この結果は、分岐部表示板に、注意を促す効果がある可能性を示唆している。つまり、事前に注意が促され、徐々に減速できたことにより、3.1(1)で述べたように、グループbのランプ2でのアクセル使用量が増え、最大減速度が抑えられた可能性が考えられる。

しかし、ヒアリング中に分岐部表示板について発話していても、分岐2での不安の理由の1つとしてカーブの線形や適切な走行速度が予測できないことを挙げている被験者が4人いた(表8)。

このように、今回設置した表示板では分岐2以降のカーブの線形や適切な走行速度を予測できない被験者が存在したため、表示板のデザインや表記を、カーブの線形

や適切な走行速度が予測しやすくなるようなものに、改める必要があると言える。

表7 グループbの分岐2の注意対象での発話

id	注意対象での発話
01b	黄色の案内標識
08b	急カーブ看板があったので減速しようと思った
10b	Rの数字
11b	カーブ標識でスピードを落とそうと思った
15b	急カーブと書いてあったので
20b	カーブが急だと書いてあった

表8 グループbの分岐2の不安理由での発話

id	不安理由での発話
04b	カーブの標識あったけど、どれくらいスピード落とせばいいのか分からない
06b	急カーブと書いてあった。初めて走行場所でカーブがどのくらい分からない
11b	カーブの角度とこのスピードで曲がれるか
20b	カーブの角度がよく分からなかった

4. 走行速度の推移と要因

前章よりグループ間にはランプ2のアクセル使用量と最大減速度にしか有意差は認められなかったため、本章以降はグループaを対象とした分析結果について述べる。まず、走行速度とその推移に注目し、走行1の車両挙動データを用いて、単独走行における速度変化の位置と量の把握を試みた。そして、その変化の要因を視線座標データを用いて分析した。

4.1 分析区間ごとの平均速度

まず、区間平均速度の箱ひげ図を図6に示す。

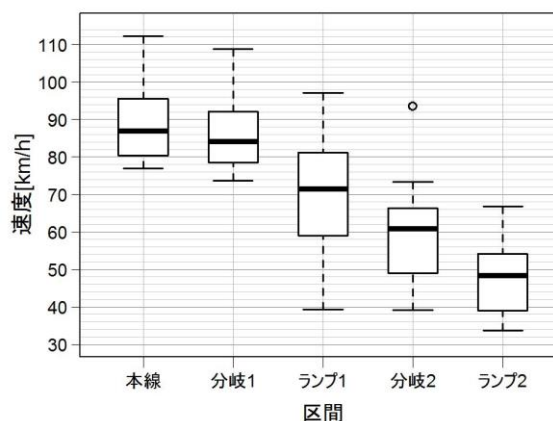


図6 区間平均速度の箱ひげ図

図6の中央値に注目すると、走行速度は分岐1からランプ1にかけて大きく低下し(84.2km/hから71.5km/h)、そのままランプ2まで速度低下が続く(ランプ2の中央値48.4km/h)ことが分かった。このことから、分岐1からランプ2の区間に大きく速度が低下する地点が存在する可能性があると言える。さらに、ランプ1での走行速度の被験者間でのばらつきが大きいことが確認できる。

4.2 速度低下地点の把握

前節で大きな速度低下が発生している可能性を示した分岐1からランプ2について、0.001kpごとに走行速度、アクセル使用量およびブレーキ使用量の被験者平均を算出し、縦断線形とともに図7に示す。このとき、縦断線形の高さは基準点からの高さを示している。

分岐1からランプ2まで順に見ていくと、まず、分岐1でアクセル使用量が低下するとともに速度低下が始まり、ランプ1の前半ではアクセル使用量が増加するが、勾配の影響で速度が急には回復できず、速度低下が続くことが分かる。ランプ1の間では、上り勾配かつ分岐に向かう状況にもかかわらず、アクセル使用量の緩やかな増加に伴い、走行速度が徐々に上昇する傾向にある。ランプ1の後半(0.6~0.7kp付近)では、アクセル使用量が特に大きく減少し、これにより速度が大きく低下している。分岐2以降、アクセル使用量が回復するが勾配の影響で速度は低下し続け、ランプ2のカーブ中央付近で再びアクセル使用量の低下とブレーキの使用が発生することで速度低下が大きくなることが分かった。

ここで、ランプ1始端左上部には40km/hの速度制限標識が設置されており、id04a, id07a, id13a, id15aは分岐1もしくはランプ1でのヒアリングの注意対象として「制限速度」を挙げており、id12aは分岐1での不安理由で「速度制限標識があることで安心した」と発話していた。このうち、id07a以外の4人はランプ1での平均速度が60km/h未満であり、分岐1からランプ1前半での速度低下には、勾配変化以外にも制限速度への意識が影響していることも考えられる。

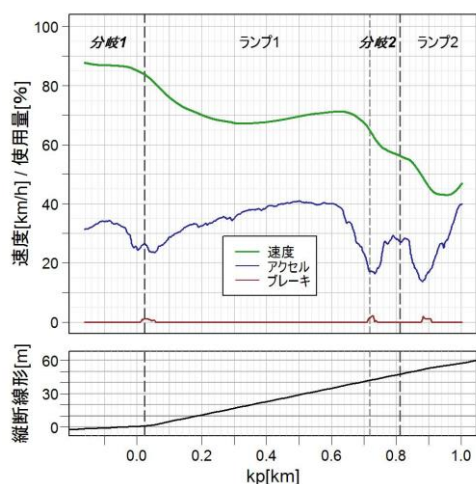


図7 速度とアクセル・ブレーキ使用量の推移図

4.3 速度低下の要因の把握

本節では、速度およびアクセル使用量の低下が最も大きいランプ1の後半から分岐2(0.488kp~0.812kp)に着目し、速度低下の要因を分析した。まず、この区間での

大きな速度低下はアクセル使用量の急減少によって引き起こされたと考え、ここでの最も急なアクセル減少を算出した。そして、アクセル使用量の急減少の要因を把握するために、知覚反応時間が2.5秒⁹⁾として、最も急なアクセル減少の減少開始前2.5秒から減少終了までを対象範囲とし、注視対象について分析を行った。ここで、最も急なアクセル減少は以下のように定義される一連のアクセル関連指標に基づき算出した。

- ・アクセル変化: ある時刻のアクセル使用量と0.1秒後のアクセル使用量の差
- ・減少開始: アクセル変化が負に転じる時点
- ・減少終了: 減少開始後、アクセル変化が正に転じるかもしくはアクセル変化0%が1秒以上継続する直前の、アクセル変化が負でなくなった時点
- ・アクセル減少: 減少開始から減少終了
- ・アクセル減少量: 減少開始時のアクセル使用量と減少終了時のアクセル使用量との差
- ・アクセル減少率[%]: $\text{アクセル減少量} / \text{減少開始時のアクセル使用量} \times 100$
- ・アクセル急減少: アクセル減少のうち、アクセル減少率が20%より大きいもの
- ・最も急なアクセル減少: アクセル急減少のうち、アクセル減少率が最大のもののうち、アクセル減少量が最大のもの

なお、id06a, id12a, id13aは、アクセル急減少が見られなかったため、分析対象外とした。また、これらの定義の概念図を図8に示す。

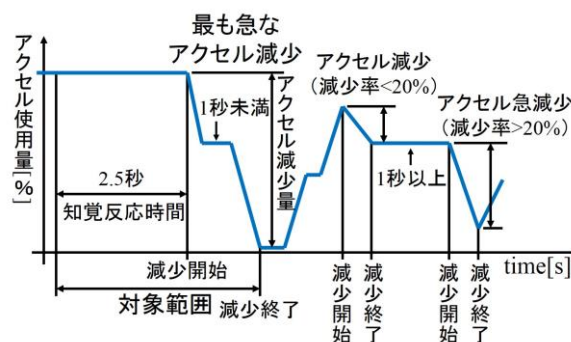


図8 最も急なアクセル減少・対象範囲の概念図

まず、対象範囲内での注視対象別被験者数の、急減速の見られた被験者全体に対する割合(以下、注視者割合。図9)を見ると、前方、左前方、ハードノーズおよび案内標識の順に多くの被験者に注視されていた。このように、注視が集中する対象が複数存在することが分かった。

次に、各被験者の総注視時間に対する注視対象別の注視時間の割合を求め、急減速の見られた被験者での平均を算出した結果を図10に示す。ここで、総注視時間とは対象範囲内で開始した注視の時間の合計値を示している。

注視時間の割合に注目すると、前方の次に左の白線(路

肩)を注視している割合が高く、一定数の被験者が左側の線形を強く意識していたと考えられる。

これらから、まず分岐端や線形への対応(壁への衝突)に注意が払われ、また同時に左前方や案内標識を注視していることから、進路にも注意が割かれていると考えられる。ここでは、短い区間に形状変化が複数集中し、また、トンネル内では標識の設置数が制限され、情報が不足するのと同時に、トンネル構造により視野が制限されるため、このように短時間に異なる目的で複数の対象に注意を払わなければならない状況が生じたと考えられ、これが大きな速度低下につながる要因の1つではないかと推測できる。

このことから、注意対象に関する情報を事前に提供し、事前に注意を促すことにより、急減速を抑制できると考えられる。

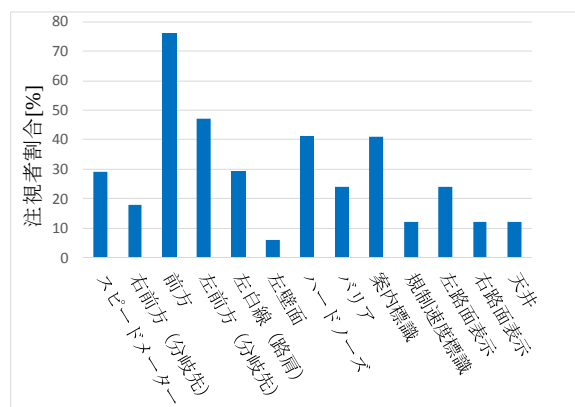


図9 注視対象別の注視者割合

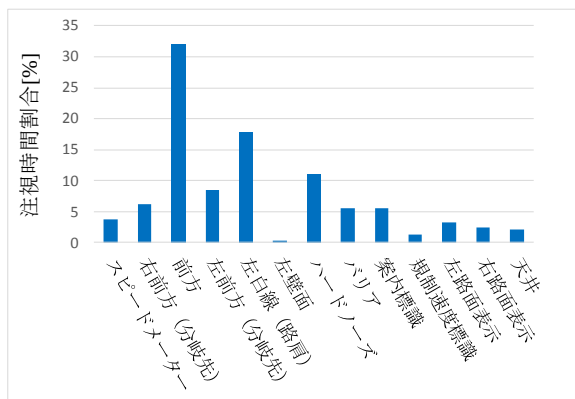


図10 注視対象別の注視時間割合の平均

5. 追従積重ね走行時の速度推移と追突リスク

本章では、追従走行時(走行3)における速度推移の傾向と車列の積重ねによる速度の変化を、0.001kpごとの各車両の速度推移図を用いて捉え、全体の傾向から外れる地点および車両に注目し、具体的にどのような状況にあるのかを分析した。

5.1 追従積重ね走行時の速度推移の把握

まず、各車両の地点速度の推移(図11)を示す。走行

順序は、id01aからid20aの順である。これより、分岐1からランプ1の前半にかけて大きく減速する傾向が見られる。単独走行時に見られたランプ1後半からランプ2にかけて大きく速度低下する傾向は見られず、これは分岐1からランプ1で既に速度が低下していたためだと考えられる。また、全体として車列が積み重なるほど速度が低下していることも読み取れる。

しかし、ある地点での速度が前方車両よりも速い状況も見られ、特に図11中の黒い円で示したところ(分岐1周辺)ではそのような状況が顕著に見られる。

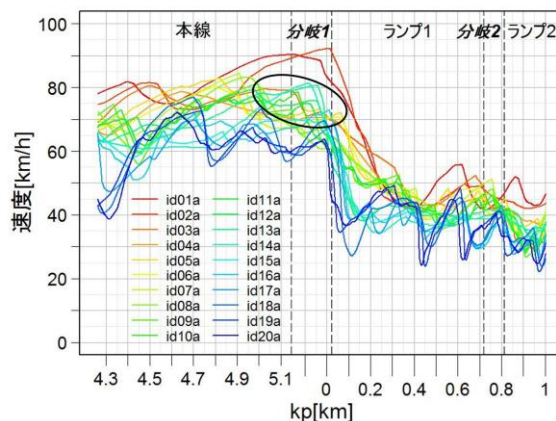


図11 各車両の速度推移図

5.2 前方車両よりも速度が速い車両の状況

この分岐1周辺(5.000kp~0.100kp)において、前方車両よりも速い状況にある車両を見出すため、0.001kpごとの前方車両との相対速度(自車両の速度-前方車両の速度)を変数として、グループaの被験者のクラスタ分析を行った。クラスタ分析の際の距離の定義としては、標準化ユークリッド距離、クラスタの連結法はWard法を用いた。クラスタ数2の場合、id01a, id05a, id08a, id09a, id10a, id12a, id13a, id18a, id20aのクラスタ(クラスタ1)と、残りの被験者のクラスタ(クラスタ2)に分類された。分岐1周辺において、グループa全体、クラスタ1、クラスタ2それぞれの相対速度の平均は、全体が2.06km/h、クラスタ1が3.30km/h、クラスタ2が1.11km/hとなっており、クラスタ1は相対速度が大きい。さらに、各地点における相対速度のグループa全体、クラスタ1、クラスタ2それぞれの平均(図12)を見ると、クラスタ1は分岐1手前から分岐1途中まで相対的に相対速度が大きく、クラスタ2は分岐1手前から分岐1途中まで相対的に相対速度が小さいことが分かる。

また、相対速度は前方車両との車間距離に影響するため、各地点における車間距離のグループa全体、クラスタ1、クラスタ2それぞれの平均(図13)を見ると、クラスタ1は相対的に車間距離が小さく、徐々に車間距離が減少していく傾向があり、クラスタ2は相対的に車

間距離が大きく、分岐 1 途中まで車間距離が増大していく、そこから減少していく傾向が見てとれる。

クラスタ 1 のように、前方車両との相対速度が大きく、車間距離が小さく、車間距離が徐々に縮まっていく状況では、前方車両への追突の危険性が高い状況にある可能性が考えられる。

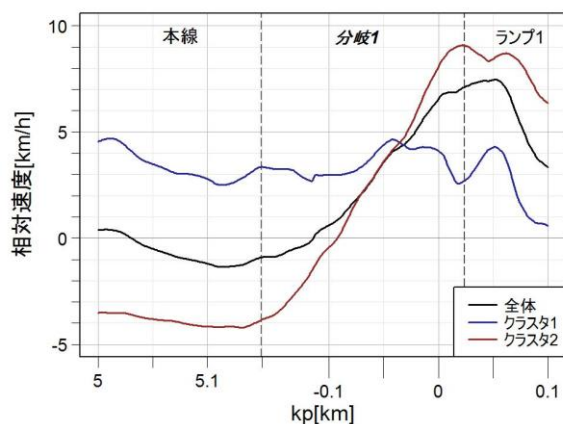


図 12 相対速度の推移図

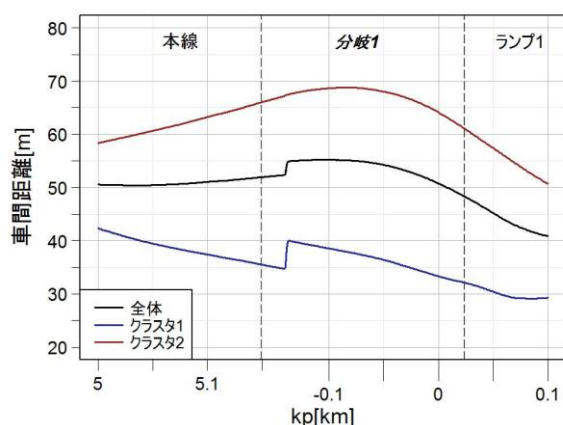


図 13 車間距離の推移図

5.3 追突事故リスクの把握

前方車両への追突の危険性を評価するため、コンフリクト指標の 1 つである PICUD¹⁰⁾を分岐 1 周辺において 0.001kp ごとに算出した。PICUD は、式(1)で定義され、前方車両が仮に急減速した場合に、後続車両が反応遅れを伴い急減速して、両者が停車したときの相対的な位置を表すコンフリクト指標である。PICUD が負値の場合、前方車両の急減速に対して、後続車両が急減速しても衝突を回避できない可能性を示す。

$$PICUD = \frac{V_1^2}{-2a} + s_0 - \left(V_2 T + \frac{V_2^2}{-2a} \right) \quad (1)$$

ここで、 V_1 、 V_2 、 s_0 ：前方車両の減速開始時における前方車両の速度[km/h]、後続車両の速度[km/h]、車間距離[m]、 T ：反応遅れ時間[s]、 a ：減速時の加速度[m/s²]。また、反

応遅れ時間と減速時の加速度は、既往研究¹⁰⁾にならない、 $T=1[s]$ 、 $a=-3.3[m/s^2]$ とした。

この結果、分岐 1 周辺ではクラスタ 1 の 9 台のうち id08a を除く 8 台の車両が PICUD が負になっており、一方で、クラスタ 2 では 11 台のうち id11a と id16a の 2 台のみ PICUD が負になっていることが分かった。つまり、前方車両よりも走行速度が速く、車間距離が小さく、車間距離が徐々に縮まっていく状況では、追突の潜在的な危険性が高い傾向にあると言える。

さらに、全区間について、グループ a の各車両の PICUD を 0.001kp ごとに求め、PICUD が負値となる車両の全車両に対する割合（以下、負値 PICUD 検出率）を算出した（図 14）。負値 PICUD 検出率が高いことは、その地点の潜在的な追突事故リスクが高いことを表している。

これにより、分岐 1 周辺、特に分岐 1 とランプ 1 の境界付近で、負値 PICUD 検出率が高いことが分かった。このことから、特に分岐 1 とランプ 1 の境界付近では、前方車両よりも速度が速く、前方車両に接近していく状況の車両が存在し、潜在的な追突事故のリスクが高い傾向があることが判明した。

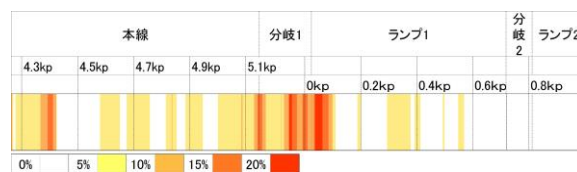


図 14 負値 PICUD 検出率

5. おわりに

本研究では、東京外環の中央 JCT を例に、短い区間に形状変化が複数集中し、トンネル特有の視環境を持つ大深度地下高速道路の JCT における車両および運転者の挙動を把握することを試みた。以下に、本研究で得られた成果を示す。

- ・今回用意した表示板では、ランプ 2 での最大減速度とアクセルの区間平均使用量にのみ有意差が認められた。ヒアリングデータから、分岐部表示板を注意の対象や理由として挙げる被験者が複数確認でき、事前に注意が促されたことによりカーブでの減速度が弱まったことが推測できる。一方で、カーブの線形や適切な走行速度が予測できないと答える被験者も存在することから、表示板のデザイン・表記を改善する必要性が伺える。
- ・単独走行時には、分岐 1 からランプ 1 の前半と、ランプ 1 の後半からランプ 2 で大きく速度低下を起こす。このうちランプ 1 後半から分岐 2 ではアクセルの使用量が急激に減少しており、これは、短い区間に形状変化が複数集中し、また、トンネル内では標識の設置数が制限され、情報が不足するのと同時に、トンネル

構造により視野が制限されることによって、短い区間に複数の注視対象が存在することが要因の1つだと推測できる。

- ・ 追従積重ね走行時、分岐1からランプ1の前半にかけて大きな減速が生じ、車列が積み重なるほど速度が低下する傾向がある。また、ランプ1後半からランプ2にかけて大きく速度低下する傾向は見られず、これは分岐1からランプ1で既に速度が低下していたためだと考えられる。さらに、分岐1周辺では、前方車両より速度が速くなり、前方車両に接近していく車両が存在し、追突事故リスクが高くなる。

本実験では、生理反応に関するデータとして走行中の心電や呼吸を計測しているが、生理反応を考慮した解析は行えていない。今後は、道路構造の生理反応への影響や、生理反応と走行中の不安との関連性を解析し、運転者の心理的な負担を評価する。そして、その結果を踏まえ、本論文で提示した交通管理上の課題を克服する方策を検討する。

謝辞

本研究は、中日本高速道路株式会社東京支社交通情報サービス研究会交通心理部会での成果の一部である。

参考文献

- 1) 佐野信夫・嘉指登志也・米川英雄・富高久智：トンネル部における走行円滑性に関する一考察，高速道路と自動車，第38巻，第3号，pp.20-28，1995.
- 2) 友枝明保：サグ部に潜む目の錯覚と『渋滞』，Civil Engineering Consultant，Vol.268，pp.24-27，2015.
- 3) 兵頭知・吉井稔雄・高山雄貴：都市内高速道路における多車線道路区間を考慮した事故発生リスク要因分析，土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol.68，No.5，pp.1349-1355，2012.
- 4) 金子哲也・大口敬・飯田克弘・渡辺亨：ドライビング・シミュレータを用いた追従挙動特性の研究，土木計画学研究・講演集，No.23(2)，pp.801-804，2000.
- 5) 松本晃一・古川健・野口雅弘・森康男・飯田克弘・池田武司：交通機能面から見たトンネル坑口のあり方に関する研究，交通工学，Vol.35，No.1，pp.28-37，2000.
- 6) 大口敬・金子哲也・飯田克弘・渡辺亨：ドライビング・シミュレータを用いた道路線形と追従挙動特性に関する研究，土木計画学研究・講演集，No.24(2)，pp.649-652，2001.
- 7) 飯田克弘・和田崎泰明・多田昌裕・筑後智弘・安時亨・澤田英郎・紀ノ定保礼：ACC 車両の混在比率が異なる交通流の安全性・円滑性評価，第37回交通工学研究発表会論文集，pp.67-74，2017.
- 8) 福田亮子・佐久間美能留・中村悦男・福田忠彦：注視点の定義に関する実験的検討，人間工学，Vol.32，No.4，pp.197-204，1996.
- 9) 福田正編：新版交通工学，朝倉書店，pp.87，2002.
- 10) 飯田恭敬・宇野伸弘・井坪慎二・菅沼真澄：織込み部におけるコンフリクト分析と車線変更のモデル化，土木計画学研究・講演集，No.24(1)，pp.305-308，2001.