

大深度地下高速道路の JCT における情報提供の課題に対するカラー連携標示の適用 Application of Color-coordinated Destination Indicator Marking to the Problem of Providing Information at Deep Underground Highway Junction

飯田 克弘¹, 遠藤 貴樹², 多田 昌裕³, 蓮花 一己⁴, 山本 隆⁵

Katsuhiro IIDA¹, Takaki ENDO², Masahiro TADA³, Kazumi RENGE⁴ and Takashi YAMAMOTO⁵

現在建設が進められている大深度地下高速道路のジャンクションは、短い区間に急勾配、急カーブ、トンネル内分合流が集中する特有の道路構造を持つ。先行研究では、ランプに標識が設置できないことなどに起因して、連続する分岐の下流側の情報が不足し、分岐部に注意対象が集中することで、運転者の負荷が増加し、そのことが、分岐部での急減速を誘発するとの示唆を得た。本研究では、この課題の対策として標識のみに依存しない案内誘導方法であるカラー連携標示に着目し、室内走行実験から得られた車両および運転者の挙動を分析することで、課題に対するカラー連携標示の対策効果を検証した。その結果、カラー連携標示が運転者の進路認知のタイミングを早めること、それにより分岐部での運転者の負荷が減少し、急減速の要因が解消されたことを確認した。

Keywords: 大深度地下, ドライビング・シミュレータ, カラー連携標示

1. はじめに

近年、わが国の都市部では通過交通の集中による渋滞の慢性化が問題となっている。この問題の解消のためには、都市部を迂回する都市環状道路を整備し、都市部への通過交通の流入を抑制する必要がある。しかし、土地利用の高度化・複雑化が進んでいる大都市圏においては、新たな道路の建設のための用地を確保することは容易ではない。

このような状況で、大深度地下利用の需要の高まりを受け、2001年に「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法」が施行された¹⁾。これにより、一定の条件を満たした事業は、事前の補償を行わずに、大深度地下を使用できるようになり、都市環状道路を大深度地下に建設することで、円滑に事業を進めることが可能となった。2019年現在、東京外かく環状道路（以下、東京外環）関越～東名区間が「大深度地下の公共の利用に関する特別措置法」の適用を受け、建設が進められている。

このような道路は地上の道路との接続部が必要であり、その役割を担うジャンクション（JCT）およびランプは、地上や浅い地下の空間的制約を受ける。具体的には、限られた範囲で地上と大深度地下を結ぶため、ランプは必然的に急勾配となり、地上の道路との接続部では急カーブが必要となる場合もある。また、既存道路との接続のため、トンネル内での分合流が必要な場合がある。さらに、発災時に備え多数の防災設備が必要な関係で、標

識を設置できない区間が存在するなど、情報提供施設の配置も制約を受ける。

筆者ら²⁾は、先行研究で、ドライビング・シミュレータ（以下、DS）を用い、東京外環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（図1）を再現し、室内走行実験を行うことより、JCTにおける車両および運転者の挙動を調査した。

まず、分岐1およびその先のランプ1において、分岐2の情報を十分に提供できないため、分岐2では、分岐端および線形への対応や案内情報の確認といった複数の運転タスクを同時に行わなければならない、短時間に複数の対象を注視する必要があることを明らかにした。また、このことが分岐2での急減速を誘発するとの示唆を得た。また、ランプは6.0%の急勾配であり、速度低下が発生することから、速度回復のためにアクセル使用量が増加する。この時、分岐2の案内情報が十分に得られていないことで、分岐の進入に対して抑制されるべき速度が抑制されない（過剰な走行速度になる）ことが、上述した急減速を助長している可能性があるとの知見を得ている。

本研究では、これらの課題の共通原因である案内情報の不足への対策として、標識のみに頼らない案内誘導方法であるカラー連携標示に着目する。カラー連携標示とは、路面着色と案内標識を同系色でカラー化させ、連携して交通誘導を行う³⁾というものであり、近年、施工実績が増加している。国土交通省北陸地方整備局⁴⁾が行っ

1 正会員、博士（工学）、大阪大学大学院工学研究科
〒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

3 正会員、博士（工学）、近畿大学理工学部

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

5 正会員、修士（工学）、中日本高速道路株式会社

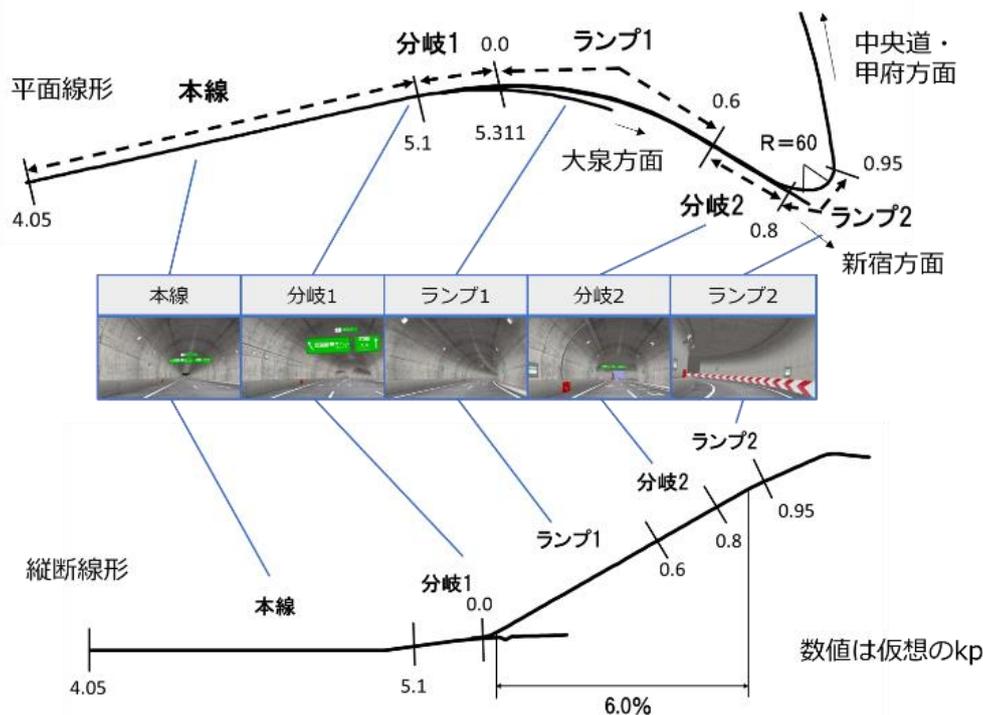


図1 東京外環を再現した道路モデルの道路線形図

たモバイルアンケートでは、85%の回答者がカラー連携標識は交通誘導に効果があると回答している。しかし、カラー連携標識の効果を定量的に評価した研究は行われておらず、運転者や車両の挙動に与える効果は明らかになっていない。よって本研究では、先行研究で対象とした道路区間にカラー連携標識による対策を行い、その対策効果を運転者や車両の挙動から分析した。

2. 室内走行実験

2.1 実験概要

本研究では、2018年11月15日および同16日、同19日から22日、同26日から30日、12月3日から同7日の計16日間で、計67名の被験者に対して実験を行った。被験者として、日常的に運転する30～50歳の男性67名を一般募集した。

2.2 実験手法

本実験では、先行研究²⁾と同様、東京外環の中央JCTのFランプ（東京外環本線北行きから中央自動車道甲府方面へ向かうランプ）を再現した道路モデル（図1）を使用した。

この道路モデルは、東京外環本線（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車線ランプで構成されている。この道路モデルについて、表1のように分析区間を指定した。なお、供用前のためkpは仮の数値である。

この道路モデルに対し、案内情報のカラー連携標識を

導入したコース（以下、改善案1、図2）、カラー連携標識を導入した上で、標識上の矢印を、従来は外側に配置されていたものを内側に変更（表2）したコース（以下、改善案2）を作成した。ここで既往のカラー連携標識で

表1 分析区間

区間名	区間 (kp)	設計速度
本線	4.05～5.10	80km/h
分岐1	5.10～0.00	80km/h
ランプ1	0.00～0.60	40km/h
分岐2	0.60～0.80	40km/h
ランプ2	0.80～0.95	40km/h

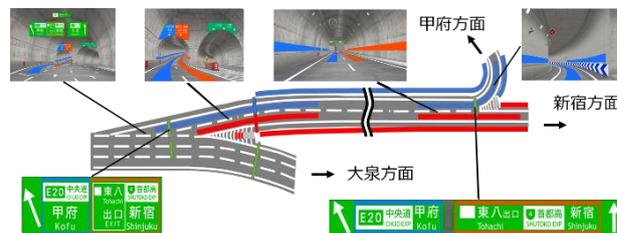


図2 改善案1のカラー連携標識の仕様

表2 改善案1と改善案2の標識

	改善案1	改善案2
本線の標識		
分岐1の標識		
分岐2の標識		

は、前述した通り標識や路面を同系色でカラー化したものが多いが、今回はトンネル区間であるため、トンネル壁面および坑口もカラー化している。また、カラー連携標識を導入しないコースは、以降、基本計画と称する。

被験者は、東京外環の道路モデルを用いた走行では、本線の第2走行車線から走行を開始し、中央道・甲府方面に向かって走行する。中央道・甲府方面に進むためには、本線で第1走行車線に車線変更を行った後、分岐1で左方向に進み、さらに、分岐2で左方向に進む必要がある。

また、東京外環の道路モデルを連続で走行することがないように、分析に使用しないダミーコースを用意した。具体的には、図1に示した平面線形と類似した線形を有している名神高速道路下り線から京滋バイパス久御山淀・宇治方面へ向かうランプを参考に作成した道路モデルを採用した。この道路モデルに対し、分岐の500m手前、250m手前、分岐点に案内標識を設置したコース（以下、ダミー1）と分岐点のみに案内標識を設置したコース（以下、ダミー2）の2つを用意した。被験者には表3の走行順で合計4回走行を行ってもらった。

表3 走行順一覧

1走行目	2走行目	3走行目	4走行目	サンプル数
基本計画	ダミー1	改善案1	ダミー2	4
基本計画	ダミー2	改善案1	ダミー1	6
改善案1	ダミー1	基本計画	ダミー2	4
改善案1	ダミー2	基本計画	ダミー1	5
ダミー1	基本計画	ダミー2	改善案1	4
ダミー2	基本計画	ダミー1	改善案1	4
ダミー1	改善案1	ダミー2	基本計画	4
ダミー2	改善案1	ダミー1	基本計画	4
基本計画	ダミー1	改善案2	改善案1	4
基本計画	ダミー2	改善案2	改善案1	4
改善案1	ダミー1	改善案2	基本計画	4
改善案1	ダミー2	改善案2	基本計画	4
改善案2	ダミー1	基本計画	改善案1	4
改善案2	ダミー2	基本計画	改善案1	4
改善案2	ダミー1	改善案1	基本計画	4
改善案2	ダミー2	改善案1	基本計画	4

分析に用いる走行

2.3 走行条件

(1)運転者への教示

まず、1走行目の前に、道を間違えてしまった場合には走行をやり直す場合があることを教示した。さらに、走行開始時の速度の目安は80km/hとしているが、その後、区間によっては異なる場合があるので、必要であれば標識や情報板を参考にするように教示した。

東京外環の走行の直前には「中央道 甲府」と書かれたフリップを、ダミーコースの走行の直前には「京滋バイパス 久御山淀・宇治」と書かれたフリップを被験者に提示し、その方面に向かうように指示した。その際、方面については案内標識や路面標識が参考にできることを教示した。

さらに、東京外環の走行では、最初の標識（4.28kpに設置、図1参照）を越えるまでは車線変更はしないこと、最初の標識を越えてからは自由に車線変更して構わないことを指示した。ダミーコースの走行では、自由に車線変更してもよいことを教示した。

また、全ての走行について、教示した点以外は普段通りの運転を心がけるように伝えた。

(2)周辺車両の配置

東京外環の本線にのみ、自律走行する周辺車両を配置した（図3）。具体的には、追い越し車線には、目標速度90km/h、目標車間距離80mで走行する車列を配置した。また、第2走行車線には、自車両前方に目標速度85km/h、目標車間距離100mで走行する車列を配置した。走行開始時の自車両と同一車線前方の車両との車間は100mとした。さらに、第2走行車線の自車両から150m後方には自車両と衝突しないように、速度が自車両と同じになるように設定した車両を配置した。第1走行車線については、自車両が甲府方面に向かうために車線変更をする必要のある車線であり、被験者が車線変更をためらうのを防ぐため、周辺車両は配置しなかった。なお、周辺車両は車線変更を行わず、分岐1では分岐をせずに、本線をそのまま進むこととした。

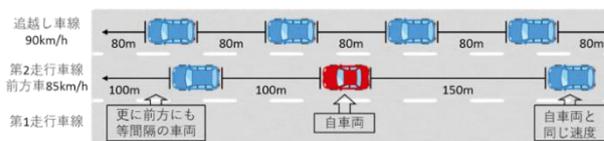


図3 周辺車両配置

2.4 実験の手順

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、実験参加同意書に記名、押印をしてもらった。その後、DSの操作方法についての説明を行った。

次に、心電や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）を装着した。

その後、DSの運転方法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、カーブでの運転操作や感覚にも慣れてもらうため、名神高速道路上り線から新名神高速道路下り線に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2回行った。1回目、2回目と

もに、走行中に実験者は、被験者に進行方向の指示のみを行った。

その後、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）を装着し、2.3(1)の教示を行ってから実験走行を行った。

全ての走行終了後、東京外環の走行について、ヒアリングを行い、指示された方面に向かうための進路が分かった地点を調査した。ヒアリングの手順については2.5(3)で詳述する。

2.5 取得データ

(1)車両挙動データ

走行開始から0.1秒ごとの経過時間（s）、走行車線、走行地点（kp）、速度（km/h）、アクセル使用量（ペダルを放しているときに0、ペダルを完全に踏み込んだときに1）をDS内に記録した。分析の際は、これらを線形補間により0.001kpごとのデータに変換した。

(2)運転挙動データ

EMRにより取得した視線座標データから、注視対象物の注視時間を算出した。なお、既往研究⁵⁾を参考にして、注視は視線停留時間0.165秒以上、眼球移動速度10deg/sとした。

(3)ヒアリングデータ

実験走行時、運転台の上にノートPCを設置し（図4）、走行の様子を録画した。全ての走行終了後、表3に示す東京外環の走行に関して、以下の手順でヒアリングを行った。まず、走行を録画した動画を再生し、被験者に走行の様子を思い出してもらった。続いて、もう一度同じ動画を再生し、「甲府方面へ進むためには、ランプ1で左車線に入ったほうが良い」と気付いた地点（以下、進路認知地点）で「ストップ」と言ってもらい、動画の再生を停止し、動画の再生時間を記録した。また、進路認知の理由を自由発話によって回答してもらった。



図4 録画用ノートPC

3. カラー連携標示が車両および運転者挙動に与える影響とその要因の把握

本稿では、カラー連携標示の対策効果を検証することを目的とし、走行繰り返しによる慣れの影響を排除するため、東京外環のモデルの最初の走行として基本計画ま

たは改善案1を走行したデータを使用した（表3参照）。

3.1 進路認知地点の比較

カラー連携標示の導入により期待される、進路認知、つまり分岐2の案内情報伝達を早める効果について検証するため、ヒアリングで取得した進路認知地点を基本計画と改善案1で比較した。具体的には、ヒアリングで記録した進路認知地点の動画の再生時間をDS本体に記録される経過時間と走行地点（kp）に照らし合わせ、進路認知地点のkpを求めた。基本計画と改善案1それぞれについて、進路認知地点を0.02kpごとの階級で表した度数分布を図5に示す。さらに、基本計画と改善案1それぞれ、被験者の進路認知地点を0kp（分岐1の終端、図1参照）より上流か下流かで分類し、分岐1までに進路認知ができた被験者数を比較した（表4）。0kpより上流側で進路認知した被験者の構成比率についてZ検定を行ったところ、有意差（ $p < 0.01$ ）が認められ、カラー連携表示による進路認知を早める効果が確認された。

また、改善案1で0kpまでに進路認知できた被験者16名を対象に、進路認知の要因となった情報提供施設を調査したところ、単独の情報提供施設として、標識のみを挙げた被験者が5名、路面のみが1名、抗口のみが2名であった。また、複数の情報提供施設を進路認知の要因として挙げた被験者も存在し、標識と路面を挙げた被験者6名、路面と抗口が2名であった（表5）。このように、進路認知の理由として、異なる複数の情報提供施設が挙げられていることから、カラー連携標示は様々な案内情報取得ニーズに対応できていることが確認された。

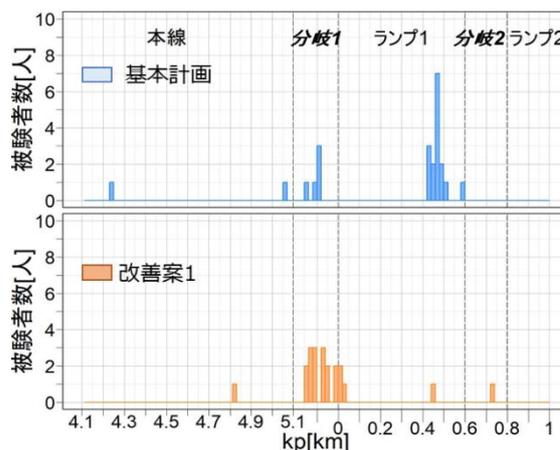


図5 進路認知地点の度数分布図

表4 進路認知地点が0kpより上流か下流かで分類した時の被験者数

	0kpより上流	0kpより下流
基本計画	7	16
改善案1	16	5

表5 進路認知の理由として挙げられた情報提供施設

進路認知の理由	単独回答			複数回答	
	標識	路面	坑口	標識+路面	坑口+路面
回答者数(人)	5	1	2	6	2

3.2 区間最低速度の比較

先行研究²⁾で分岐2での急減速を助長する要因と示唆された、ランプで発生する過剰な速度が抑制されているのか検証するため、区間最低速度を基本計画と改善案1で比較した。分岐1以降の各区間の区間最低速度の平均値を算出し、基本計画と改善案1で比較（t検定）したところ、基本計画に比べ、改善案1の分岐1、ランプ1、分岐2における区間最低速度が小さく、有意傾向（ $p<0.10$ ）が見られた（図6）。分岐に対する過剰な速度が見られたランプにおいて、走行速度が低くなる傾向が明らかになった。この理由として、分岐2の情報を早期に得たことで分岐に対する予備動作ができていた可能性や、路面や壁面の着色が注意を促した可能性などが考えられる。メカニズムの解明は今後の課題であるが、カラー連携標示による案内情報提供によって情報不足を要因とする過剰な速度が抑制される可能性が示唆された。

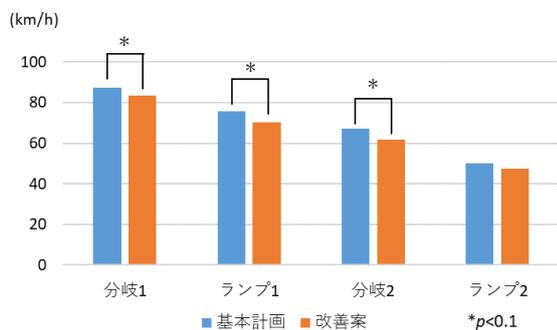


図6 区間最低速度の被験者平均

3.3 急減速発生時の注視の比較

カラー連携標示が、分岐部での急減速を誘発すると示唆されている短時間に複数存在する運転タスクを緩和するかを検証するため、先行研究²⁾に準じ、分岐2においてアクセル使用量が最も急に減少した時の注視対象について分析を行った。アクセル使用量の変化（ある時刻から0.1秒後のアクセル使用量—ある時刻でのアクセル使用量）が負になる時点（アクセル減少開始）から、その後、アクセル使用量の変化が0（%）の状態が1秒以上続くもしくは正に転じる時点（アクセル減少終了）までを1回のアクセル使用量の減少（以下、アクセル減少）とした。そのうち、アクセル減少率（{減少開始時のアクセル使用量-減少終時のアクセル使用量} / {減少開始時のアクセル使用量}）が最大のものが、その中でもアクセル減少

量（減少開始時のアクセル使用量-減少終時のアクセル使用量）が最大のものを最も急なアクセル減少と定義した。最も急なアクセル減少の定義の概念図を図7に示す。

分析範囲は、運転者の反応時間を考慮して、最も急なアクセル減少のアクセル減少開始2.5秒前からアクセル減少終了までとした。なお、最も急なアクセル減少のアクセル減少率が20%以下の場合、分析対象外とした。これは、意図的なアクセル操作による急減速が少ないと考えられる本線における、全てのアクセル減少のアクセル減少率の平均値が10.5%、標準偏差が15.8%であり、アクセル減少率20%程度のアクセル減少までならば、意図的なアクセル操作による急減速とは言えないと考えたためである。また、取得した視線データの精度が悪かった場合にも分析から除外した。分析対象者数は基本計画が19名、改善案1が18名となった。

基本計画と改善案1とで、注視対象別に、分析範囲において注視が発生した被験者の割合（図8）と、分析範囲内における総注視時間の被験者平均（図9）を算出した。

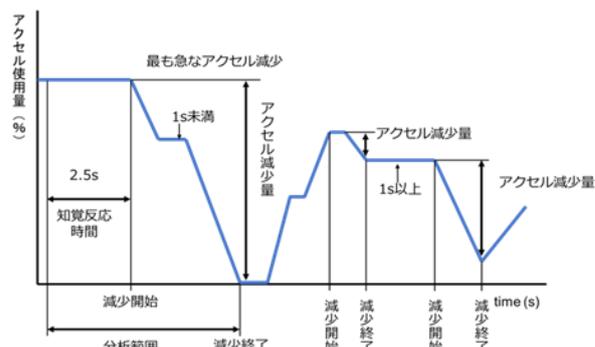


図7 最も急なアクセルの概念図

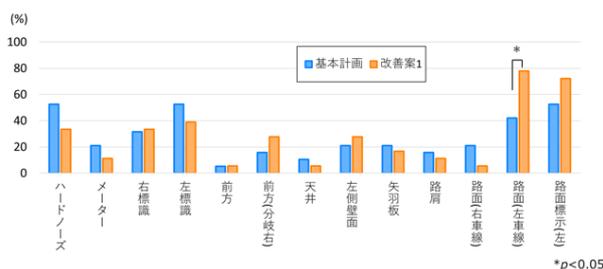


図8 注視対象ごとの注視が発生した被験者の割合

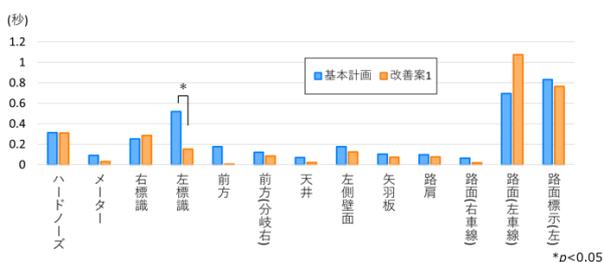


図9 注視対象ごとの総注視時間の被験者平均

注視が発生した被験者の割合についてZ検定を行ったところ、ほとんどの注視対象で有意差は認められなかったが、路面（左車線）の注視が発生した被験者の割合にのみ有意差 ($p < 0.05$) が見られ、基本計画の42%に対し、改善案1では78%と割合が大きくなった。分析範囲である分岐2は6%の上り勾配であることから、水平方向前方を見ている運転者の視線は、車両前方端の直下より先の路面に向くことが考えられる。つまり、前方に注意が向けられている可能性が示唆された。また、左車線は甲府方面へ向かう車線であり、左車線を注視すれば、必然的に進行方向に視線が向き、進行方向の線形や交通状況を確認できる状態にある。これに加えて、改善案1では、路面（左車線）を注視した被験者の割合が高いが、それ以外の注視対象に関しては、注視した被験者の割合は減少していない。すなわち、基本計画では、アクセル急減速時、つまり減速し始める際に、進行方向を確認しつつ減速できている被験者の割合は4割程度だったのに対し、改善案1では、他の注視対象に加え、進行方向も確認しつつ減速できている被験者の割合が増加したと考えられる。従って、カラー連携標示が、安全運転を促すことにつながると考えられる。

総注視時間の被験者平均についてt検定を行ったところ、左標識の総注視時間の被験者平均に有意差 ($p < 0.05$) が見られた（図9）。基本計画の0.52秒に対して、改善案1は0.15秒であり、総注視時間が減少している。3.1節で示された通り、進路認知が事前にできていたことが一因と考えられる。

また、標識はトンネルの天井に設置されており（図10）、左標識の注視には視線の上下移動が伴う。武田ら⁶⁾は、視線を下方に向けると焦点の調節が発生することを示唆している。視線の上下の移動が必要な左標識の注視時間の少ない改善案1は、焦点の調整も少なく、運転者の負担が軽減されていると考えられる。



図10 分岐2の標識

4. おわりに

本研究では、大深度地下高速道路JCTにおける情報提供の課題に対して、カラー連携標示を導入した場合の対策効果を車両挙動および運転挙動から検証した。以下に本研究で得られた成果を示す。

- ・ 基本計画に比べて改善案1の方が、進路認知地点が

0kpよりも上流側にある被験者が多いことが示された。つまり、課題となっていた、連続する分岐の下流側の案内情報の早期伝達が確認された。

- ・ 改善案1では、基本計画に比べて分岐1・ランプ1・分岐2の区間最低速度が低い傾向が見られ、分岐2での急減速を助長する過剰な速度が発生したランプにおける、走行速度の低下が明らかになった。このことから、カラー連携標示による案内情報提供が、情報不足を要因とする分岐に対する過剰な速度の抑制につながる可能性が示唆された。
- ・ 分岐2で発生する最も急なアクセル減少時の注視分析を行ったところ、改善案1では路面（左車線）の注視が発生した被験者の割合が大きくなった。視線を進行方向の前方に向けると路面（左車線）に視線が向くことから、運転者が前方の進路や線形にも注意しつつ減速できている傾向が表れたと考えられる。また、左標識の注視時間が減少していることから、焦点の調整を誘発する視線の上下移動が減少し、負担が軽減されていると考えられる。

しかし、ランプでの走行速度の低下は確認されたものの、設計速度を考えると、改善案1の速度も十分に抑制されているとはとは言えない。また、速度が抑制される要因の特定には至っておらず、詳しいメカニズムの分析が求められる。さらに、分岐2で発生する急減速の緩和効果は確認できなかったことから、案内情報提供以外の要因について調査していく必要がある。これらは、今後の課題である。

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学部会で実施した実験データの一部を使用した。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省：大深度地下の公共的使用に関する特別措置法・基本方針・各指針，https://www.mlit.go.jp/toshi/daisei/crd_daisei_tk_000008.html，2008。（2019年2月4日閲覧）
- 2) 飯田克弘・遠藤貴樹・多田昌裕・蓮花一己・山本隆・中村丈彦：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，交通工学論文集，5巻2号，pp.A_257-A_266，2019。
- 3) 中日本高速道路株式会社：海老名ジャンクション圏央道内回り東名方面ランプウェイの2車線化（暫定）で運用開始，https://www.c-nexco.co.jp/corporate/pressroom/news_release/3893.html，2016。（2019年4月29日閲覧）
- 4) 織田正光・斉藤修三・櫻井直樹・山本彰・早川博：

黒埼 IC における路面と標識のカラー連携標示による交通誘導について, http://cds.nagaokaut.ac.jp/niigata_forum/symposium2009_pdf/4/4023.pdf, 2009. (2019年2月4日閲覧)

5) 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.

6) 武田常広・C.Neveu・L.Stark：視線方向と眼の焦点調節, テレビジョン学会誌, Vol.46, No.3, pp.308-314, 1992.