

ETC2.0プローブ情報を活用した トンネル内急カーブ区間の対策効果検証

川原 純一¹・遠藤 学史²・角田 征³・田中 淳⁴・松井 祐樹⁵・金子 太郎⁶

¹非会員 首都高速道路(株) 東京西局 (〒102-0093 東京都千代田区平河町二丁目16-3)
E-mail: j.kawahara196@shutoko.jp

²正会員 首都高速道路(株) 計画・環境部 (〒100-8930 東京都千代田区霞が関1-4-1)
E-mail: s.endo5944@shutoko.jp

³非会員 首都高速道路(株) 東京西局 (〒102-0093 東京都千代田区平河町二丁目16-3)
E-mail: t.sumida87@shutoko.jp

⁴正会員 (株)オリエンタルコンサルタンツ 交通技術部 (〒151-0071 東京都渋谷区本町三丁目12-1)
E-mail: tanaka-at@oriconsul.com

⁵正会員 (株)オリエンタルコンサルタンツ 交通技術部 (〒151-0071 東京都渋谷区本町三丁目12-1)
E-mail: matsui-yu@oriconsul.com

⁶非会員 (株)オリエンタルコンサルタンツ 交通技術部 (〒151-0071 東京都渋谷区本町三丁目12-1)
E-mail: kaneko-tr@oriconsul.com

首都高速道路の大橋ジャンクションは、3号渋谷線の高架部と中央環状線のトンネル部間約70mの高低差を連結するループ構造を有するジャンクションである。楕円形の覆蓋構造を有する当該箇所は、約7%の下り勾配と曲線半径40~50mの急カーブ部が連続する連絡路であり、速度超過や路面湿潤等が原因による施設接触事故や横転事故等交通事故件数が多発しているところである。平成27年12月までに急カーブ部における事故対策として、速度抑制および路面上のグリップ力向上を図るため、注意喚起カラー舗装の打ち替えを実施したところ、交通事故件数の減少が確認されている。本稿は、ETC2.0プローブデータや画像データ等を活用し、当該箇所の注意喚起カラー舗装の打ち替え前後における、急ハンドル回数や速度抑制状況等から、注意喚起カラー舗装による交通事故削減のメカニズムを検証したものである。

Key Words : alerting color pavement, bending curve, tunnel, ETC2.0 probe data, driving behavior

1. はじめに

首都高速道路の大橋JCTは、高架になっている3号渋谷線とトンネルになっている中央環状線(大井~熊野町JCT間)を結ぶJCTである(位置は図-1参照)。また、限られた土地を利用して高架とトンネルを接続させるため、楕円形の覆蓋構造となっており、急な下り勾配と急カーブが連続する構造となっている。そのため、急カーブ部を中心に速度超過等が原因による施設接触事故や横転事故が多発していた。そこで、事故多発箇所において速度抑制及び路面上のグリップ力向上のため、2015年10月10日(土)に注意喚起カラー舗装の施工を実施した。その結果、交通事故件数の大幅削減が図られた。



図-1 大橋JCT位置図

川野ら¹⁾は、首都高速道路の西東京管理局管内（現東京西局管内）のカーブ部で施工された赤色の注意喚起カラー舗装に事故削減効果について分析しており、本稿で着目している大橋JCTと同様に施設接触事故が大幅に削減されたことを確認している。また堀田ら²⁾は、本稿と同じくETC2.0プローブ情報を活用して注意喚起カラー舗装実施箇所における車両挙動の発生状況を分析している。しかしながら、トンネル内においても走行履歴や挙動履歴を取得できる特性を生かして対策の効果検証を実施した事例がない。

本稿では、大橋JCT内で施工された注意喚起カラー舗装が交通挙動に与える効果を検証するため、車両感知器データおよびトンネル内でもデータが記録されているETC2.0プローブデータを使用して、速度や急減速、急ハンドル操作の発生状況について分析を行った。

2. 事故対策の概要

(1) 対策実施区間の概要

大橋JCTのカラー舗装の実施状況のイメージを図-2に示す。大橋JCTの周回部は楕円形の構造になっており、カーブが最も急な箇所ではR=41.5mで5.6%の下り勾配、カーブが最も緩い箇所ではR=200mで7%の下り勾配となっている。

従来よりトンネル内における分岐案内および速度抑制対策として各箇所カラー舗装が実施されている。その中で、事故多発箇所である3号渋谷線から中央環状線へ向かう大橋JCT下り坂下層部について、2015年10月に舗装打ち替えが実施された。対策前後の写真を図-3に示す。舗装打ち替えが実施された範囲は図-2の緑矢印に示す範囲である。曲線半径が小さい箇所は赤と黒のゼブラ、曲線半径が大きい箇所については全面赤色の舗装を行った。当該箇所はすでにトンネル内分岐が終了している箇所であるため、カラー舗装を行うことで、速度超過やカーブに対する注意喚起を目的としている。



図-2 大橋JCT模式図

(2) 対策実施区間の事故発生状況

対策を実施した区間における対策前の事故発生状況を図-4に示す。半年間で42件の事故が発生しており、うちカーブを曲がりきれずに発生したと考えられる施設接触事故が28件、横転転覆事故が5件である。また、人身事故も半年間で4件の事故が発生しており、うち2件は施設接触事故によるものであり、うち1件は横転転覆事故によるものである。なお、施設接触事故件数については雨天時の事故が目立っており、28件中26件が路面状態が湿潤状態の時に発生している。大橋JCT内は覆蓋構造であるものの、雨天時にタイヤ等についた水滴が路面との摩擦係数を低下させ、車両がスリップしやすい状況が起こりやすかったと考えられる。



図-3 大橋JCT対策前後写真

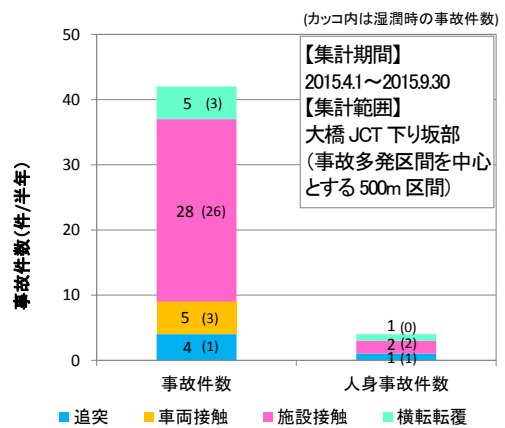


図-4 大橋JCT下り坂部事故発生状況

また、事故発生位置を図-5に示す。大橋JCTの様々な位置で事故が発生しているが、特に下り坂2周目の急カーブ部で集中して事故が発生していた。そのため、事故多発箇所の前後区間において注意喚起カラー舗装を実施した。

(3) 事故削減状況

対策が行われた大橋JCT下り坂下層部の事故件数の推移を表-1に示す。カラー舗装対策実施前に毎月発生していた施設接触事故は、対策後事故が1件も発生していない。また、同じく1~2件/月発生していた横転転覆事故も、対策後事故が1件も発生していない。

このことから、カラー舗装対策による事故削減効果が発現していると考えられる。そのため、事故削減に至った要因を検証するため、注意喚起カラー舗装が交通挙動に与える効果を次章以降で検証した。

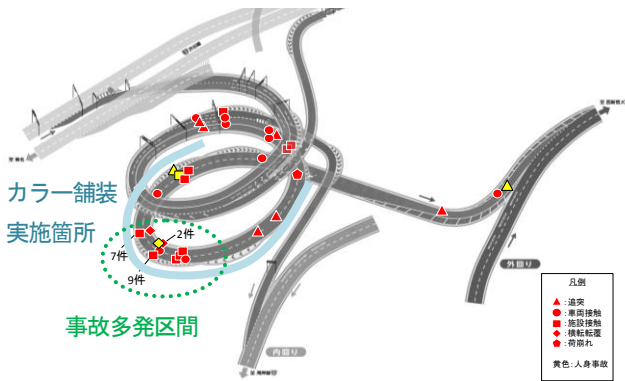


図-5 大橋JCT下り坂下層部事故発生位置

表-1 大橋JCT下り坂下層部事故件数推移

事故形態	対策前						対策後						合計			
	H27													H28		
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月				
施設接触	6	1	4	5	1	11	0	0	0	0	0	0	0	0	28	
車両接触	1	0	0	1	1	2	3	0	0	0	0	0	0	8		
追突	1	1	0	1	0	1	1	1	0	2	0	0	8			
横転転覆	1	0	1	2	0	1	0	0	0	0	0	0	5			
計	9	2	5	9	2	15	4	1	0	2	0	0	49			

【集計範囲】大橋 JCT 下り坂下層部
(事故多発区間を中心とする 500m 区間)

3. データ収集

交通挙動に与える影響を分析するため、本稿では交通量や車両の走行速度を把握できる車両感知器データ、および車両の走行速度や急ブレーキ・急ハンドル操作状況を把握できるETC2.0プローブデータを収集した。

(1) データ収集

a) 車両感知器データ

本稿で使用する車両感知器データの概要は表-2に示す。対策前後の平日14日間ずつのデータを収集した。なお、車両感知器の設置位置は図-6に示す。3号渋谷線上りから中央環状線内回り上には全部で13箇所の車両感知器が設置されている。

表-2 車両感知器データ収集概要

項目	内容	備考
使用箇所	3号渋谷線上り→中央環状線内回り上に設置されている全13箇所	超音波式…4箇所 画像式…9箇所 (画像式は速度データのみ使用)
集計期間	【対策前】 2015.9.15~10.9の平日14日間 (2015.9.24および9.25は除く) 【対策後】 2015.10.13~10.30の平日14日間	・集計単位は5分間 ・シルバーウィーク期間中のため対策前の9.24および9.25は対象外とした。

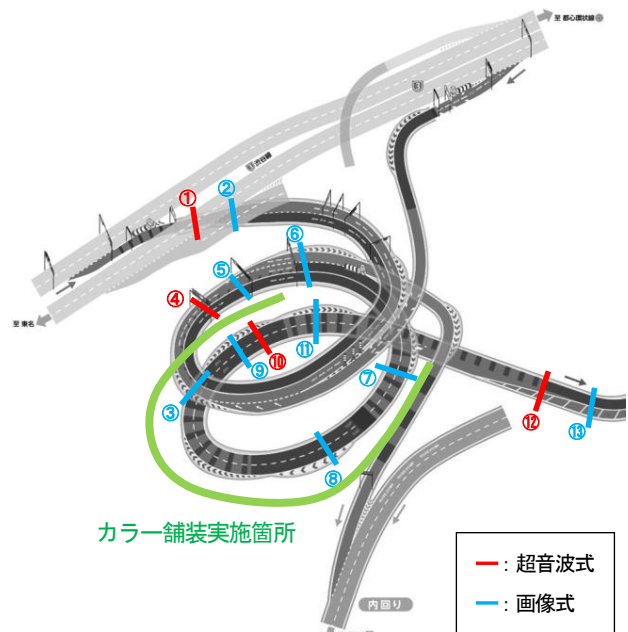


図-6 大橋JCT内車両感知器設置位置

b) ETC2.0プローブデータ

本稿で使用するETC2.0プローブデータの概要は表-3に示す。走行履歴データ、および挙動履歴データを使用した。

(2) ETC2.0プローブデータの補正

表-3の備考に示す通り、大橋JCTにおいてETC2.0プローブデータを使用する際は補正が必要な状況であった。図-7に示す通り、取得した生データを使用すると、データが一部欠損していたり、データが二重に存在している状況がみられる。

これは、大橋JCTは2層構造となっており、緯度経度上では同じ箇所を繰り返し通行することになり、緯度経度からでは1周目を走行しているか2周目を走行しているか区別がつかないためである。そのため、2周目を走行しているが1周目を走行している形でキロポストが記録されているデータが非常に多く存在する。この現象は、ETC2.0プローブデータに記録されている時刻が進んでいるのにも関わらず、走行位置が以前走行していた位置に戻ることで確認することができる。ただし、緯度経度は正しく取得できており、地図上にプロットした場合の車両の動き方は正しいものとなっている。(図-8参照)

表-3 ETC2.0プローブデータ収集概要

項目	内容	備考
使用箇所	3号渋谷線→中央環状線→向かうルートを通行したデータ	分析をするうえで、補正が必要。
集計期間	<p>【対策前】</p> <p>《走行履歴》 2015.9.15～10.9の平日14日間 (2015.9.24および9.25は除く)</p> <p>《挙動履歴》 2015.10.1～10.9の平日7日間</p> <p>【対策後】</p> <p>《走行履歴》 2015.10.13～10.30の平日14日間</p> <p>《挙動履歴》 2015.10.13～10.19の平日7日間</p>	集計期間は 走行履歴:平日14日間 挙動履歴:平日7日間

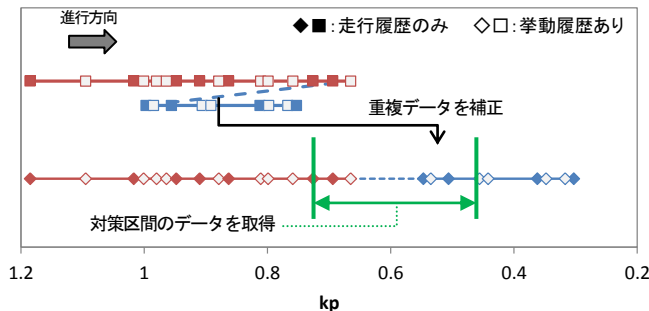


図-7 生データと正しい並びの例

そのため、図-9に示すフローに従って補正を実施した。はじめに、データの取得時刻と走行位置との関係性をすべて確認し、時刻は進んでいるが走行位置が後退しているデータを抽出した。抽出したデータに対して、走行位置に450mを加算することで、2周目を走行しているものとしてデータの補正を行った。なお、補正する距離は記録されている緯度経度データと照合することで算出した。そして補正したキロポストを使用して、車両挙動の分析を実施した。

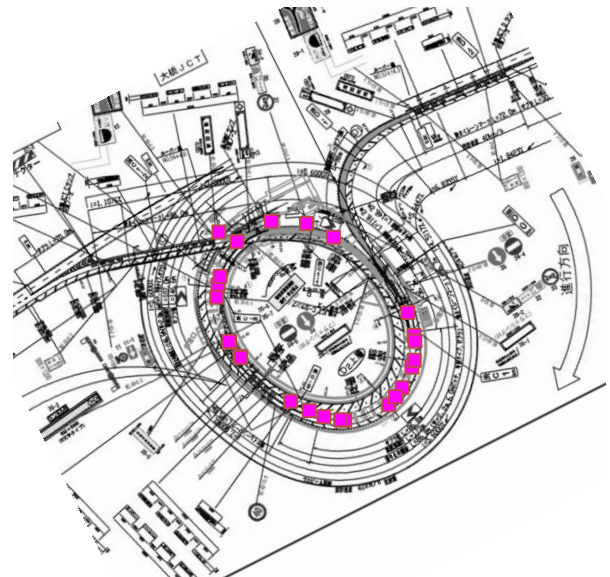


図-8 データの緯度経度取得状況

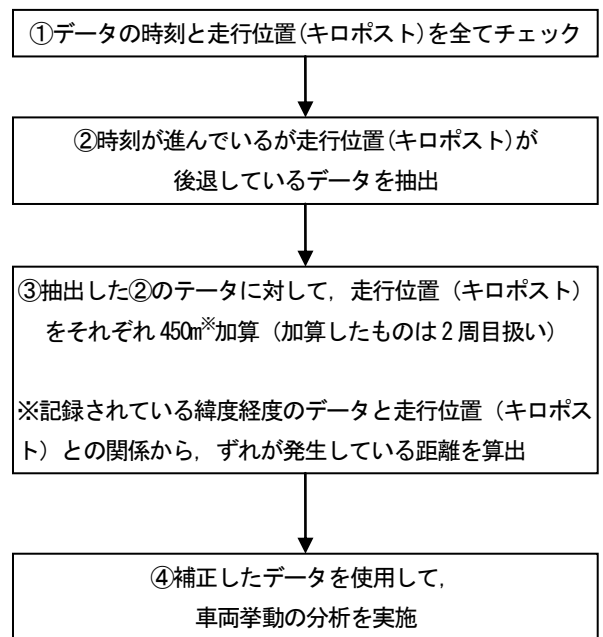


図-9 ETC2.0プローブデータの補正方法

(3) ETC2.0プローブデータの取得状況

a) データ取得台数と捕捉率

ETC2.0プローブデータの日ごとのデータ取得台数を図-10に示す。概ね各日400～500台/日分のETC2.0プローブデータを取得している。また、車両感知器により観測された台数と、ETC2.0プローブデータによる通過台数を照合することにより算出したETC2.0プローブデータ捕捉率を同じく図-10に示す。各日とも、大橋JCTを通過した車両のうち2%弱がETC2.0搭載車両である。

時間帯別のETC2.0プローブデータ取得台数および捕捉率を図-11に示す。データの取得台数は深夜3時が最も少なく100台/時以下、朝ピークの7～8時台が最も多く400～500台/h程度となっている。一方、車両感知器により観測された交通量をもとに算出した捕捉率も時間帯ごとに大きく差があり、最も補足率が少ない3時台は1%以下、夕ピーク後の20～22時台が最も高く2.5～3.0%前後となっている。

b) キロポスト別データ件数

キロポストごとにデータの件数を整理したものを図-12に示す。データの取得件数が多くなっている場所(0.3kp, 0.5kp, 0.7kp前後)は急カーブ部などである。そのため、これらの場所では挙動履歴も取得できる。そのため、相対的にカーブがきついところはデータが密にとれている。

一方で、(2)の方法を用いてデータを補正しても、データが取得できていない箇所も存在するが、対策実施区間の大半についてはデータが取得できているため、(2)の方法を用いて補正したデータを使用して、対策効果分析を実施した。

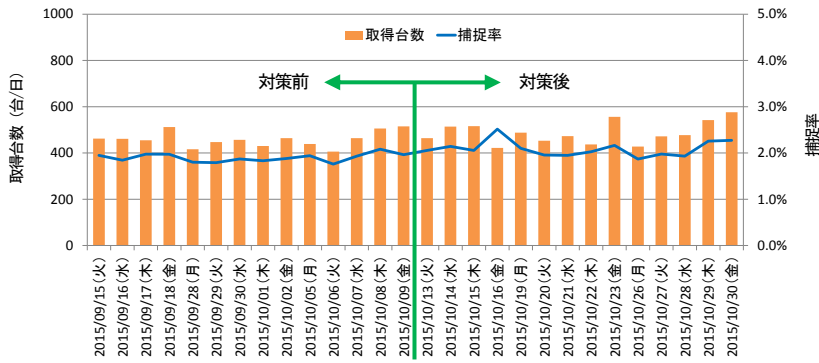


図-10 日別ETC2.0データ取得台数と捕捉率

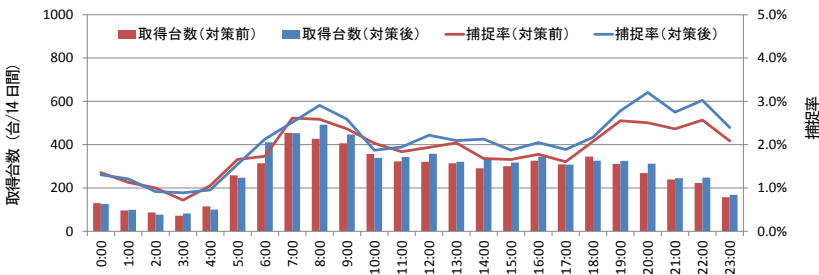


図-11 時間帯別ETC2.0データ取得台数と捕捉率

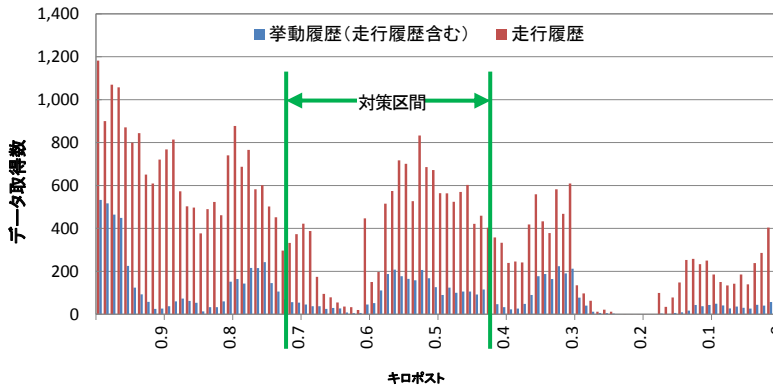


図-12 キロポスト別データ取得件数 (対策前のみ)

4. 車両挙動面からみた対策効果分析

(1) 車両感知器データ

大橋JCT下り勾配部におけるQV図を図-13に示す。大橋JCTには超音波式と画像式の車両感知器が全部で13箇所設置されているが、超音波式の車両感知器が設置されている箇所のうち、3箇所のデータを使用してQV図を作成した。対策実施区間に設置されている超音波式の車両感知器は、⑩のみである。

対策区間に設置の⑩と対策区間前後に設置してある④と⑫と比較すると、観測されている交通量レベルによらず、④→⑩→⑫の順に速度が高くなる傾向にある。これは、大橋JCT内で長い下り坂が続くことが影響している

と考えられる。なお、各車両感知器で計測された平均速度の結果を図-14に示す。対策前後ではほぼ速度状況に変化が見られない状況である。

図-15に対策前の上り勾配・下り勾配2周目のQV図、図-16に対策後の上り勾配・下り勾配2周目のQV図をそれぞれ示す。規制速度が40km/hの区間であるものの、対策前後ともに下り坂は速度が50～60km/h付近に集中している。一方で、上り坂は速度が40～50km/h付近に集中している。同じカーブ部においても上り坂と比べて下り坂の方が10km/h前後速度が高くなっているため、下り坂の方が事故リスクが比較的高いことが想定される。

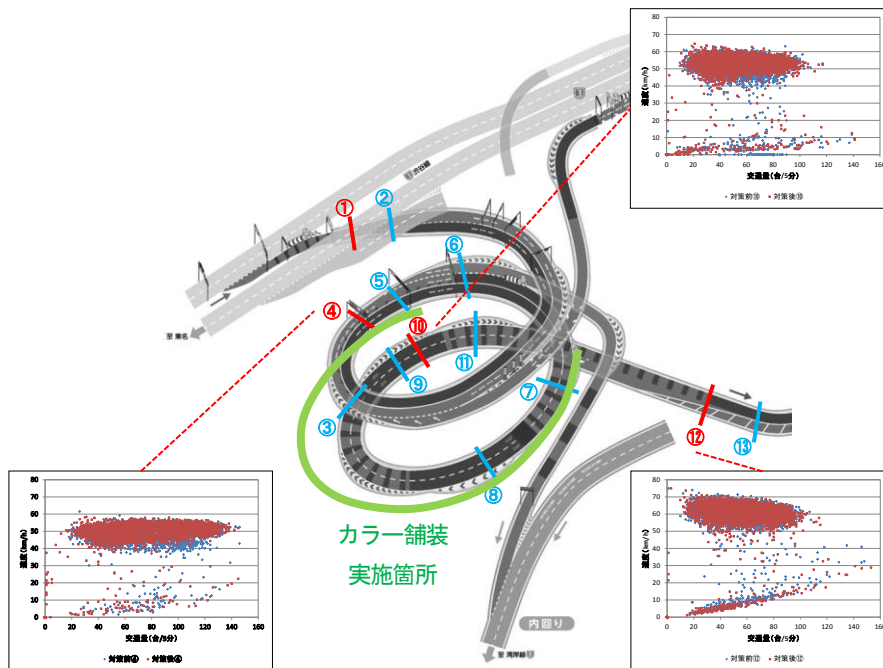


図-13 大橋JCT内QV図（超音波式車両感知器設置箇所のみ）

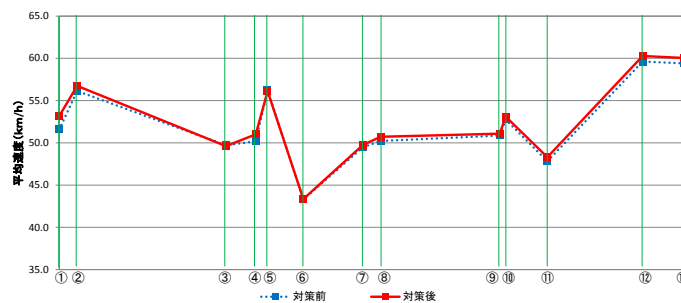


図-14 大橋JCT下り勾配部平均速度

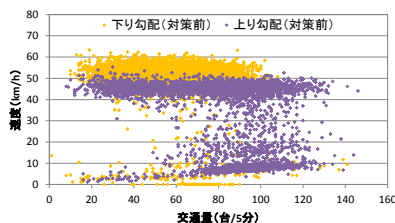


図-15 大橋 JCT 対策前 QV 図

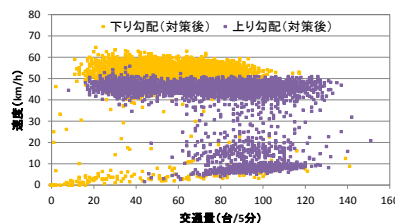


図-16 大橋 JCT 対策後 QV 図

(2) ETC2.0プローブデータ (速度状況)

a) 速度プロフィール図から見る速度状況

補正したETC2.0のデータを使用した速度プロフィール図に平均値・中央値・85%タイル値を併記した図について、対策前を図-17に示し、対策後を図-18に示す。

対策前、対策後ともに平均値及び中央値は50km/h前後で推移しており、85%タイル値は60km/h前後で推移しており、対策前と対策後で大きな速度変化は発生していない。これは対策区間においても同様の傾向となっている。

なお、対策区間においては0.6~0.7kp間で速度が上昇する傾向がみられる。この区間は図-19の通り曲線半径が一時的に大きくなる区間にあたるため、比較的速度が出しやすい状況になっているものと考えられる。

b) 50mピッチの速度状況 (中間補完)

ETC2.0プローブデータは、一定間隔または急減速や急ハンドルなど、車両挙動に大きな変化が存在した時のみ、

その際速度等の状況を記録する仕組みとなっている。車両挙動に大きな変化がない場合、データの取得間隔は200mであるため、中間地点の速度変化が取得できない。そのため、中間地点の速度データを補完するため、図-20に示すイメージで中間補完を行った。ETC2.0プローブデータを取得できている地点間を直線補完したうえで、50mごとに速度を算出するというものである。この補完を行うことで、通過したETC2.0搭載車の全てを対象にした速度状況を確認することが可能となる。

前述の中間補完した速度データをもとに速度分布を整理したものを図-21および図-22に示す。

対策前、対策後ともに50km/h前半周辺が中央値となっている。なお、対策区間で対策前後の詳細を確認すると、各kpとも速度が増加しているが、その増加幅は1km/h以下とわずかなものである。そのため、注意喚起カラー舗装対策前後における速度の変化は見られない状況である。

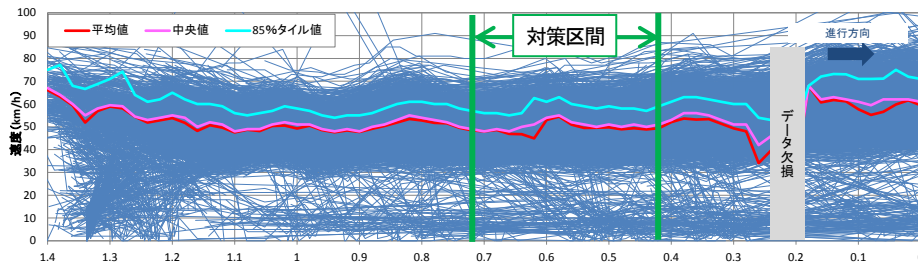


図-17 大橋JCT下り勾配部速度プロフィール図 (対策前)

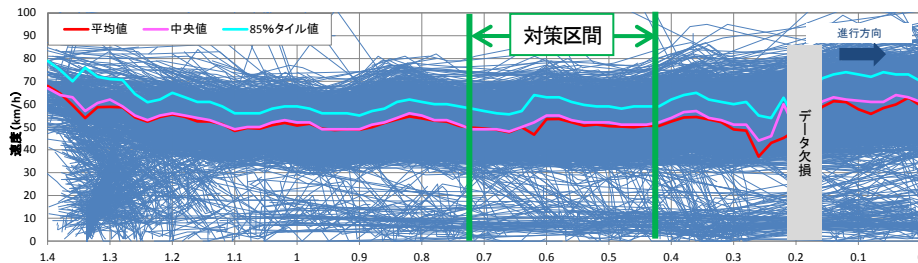


図-18 大橋JCT下り勾配部速度プロフィール図 (対策後)

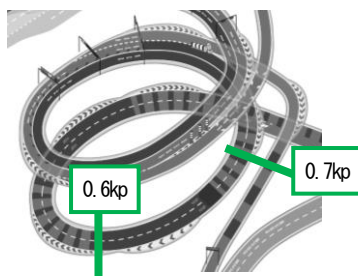


図-19 大橋JCT下り勾配部拡大模式図

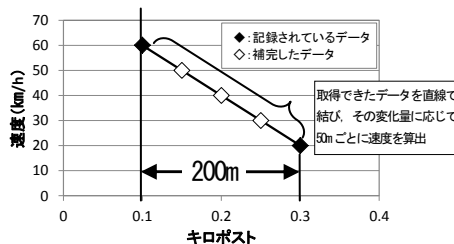


図-20 速度データの補完イメージ

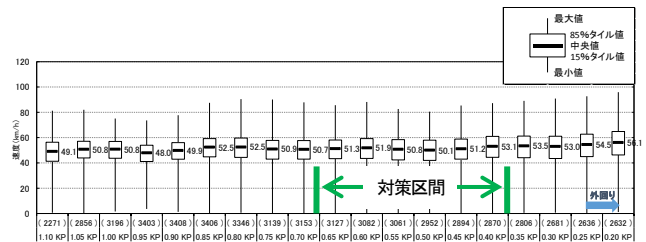


図-21 50mピッチ速度分布図 (対策前)

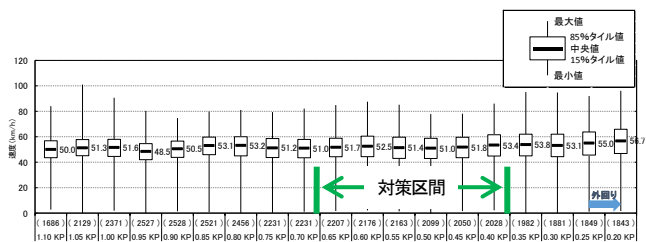


図-22 50mピッチ速度分布図 (対策後)

c) 速度変動図

速度遷移図は、キロポストごとかつ速度域ごとに取得できたデータのサンプル数の多さを可視化することで、概ねの速度の変化を把握することができる。対策前の速度階層別頻度を図-23に、対策後の速度階層別頻度図を図-24に示す。対策前、対策後ともに1.0kpかつ50km/h前

後が最もサンプル数が多い。また、平均値・中央値は概ね50km/h前半で推移している。一方、85%タイル値と中央値は+8km/h程度の差が存在し、対策区間内においても速度が60km/hを超える場合がある。なお、速度は曲線半径が緩くなった後再びきつくなり始める箇所では速度が上昇する傾向にある。

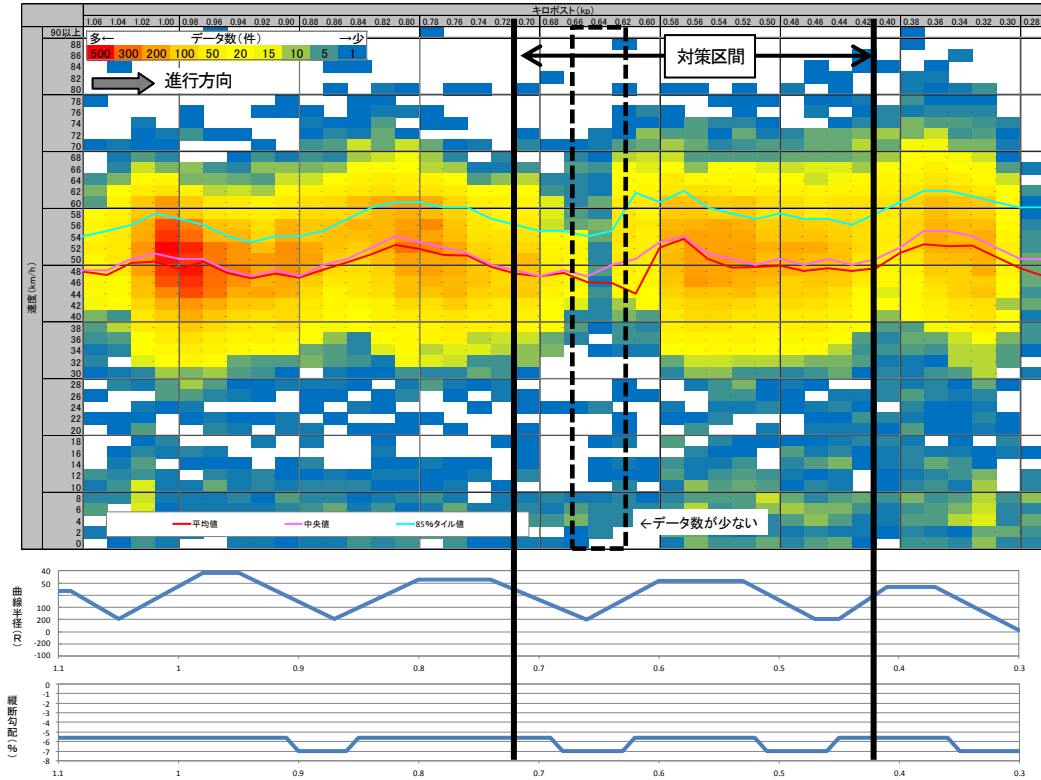


図-23 速度階層別頻度図 (対策前)

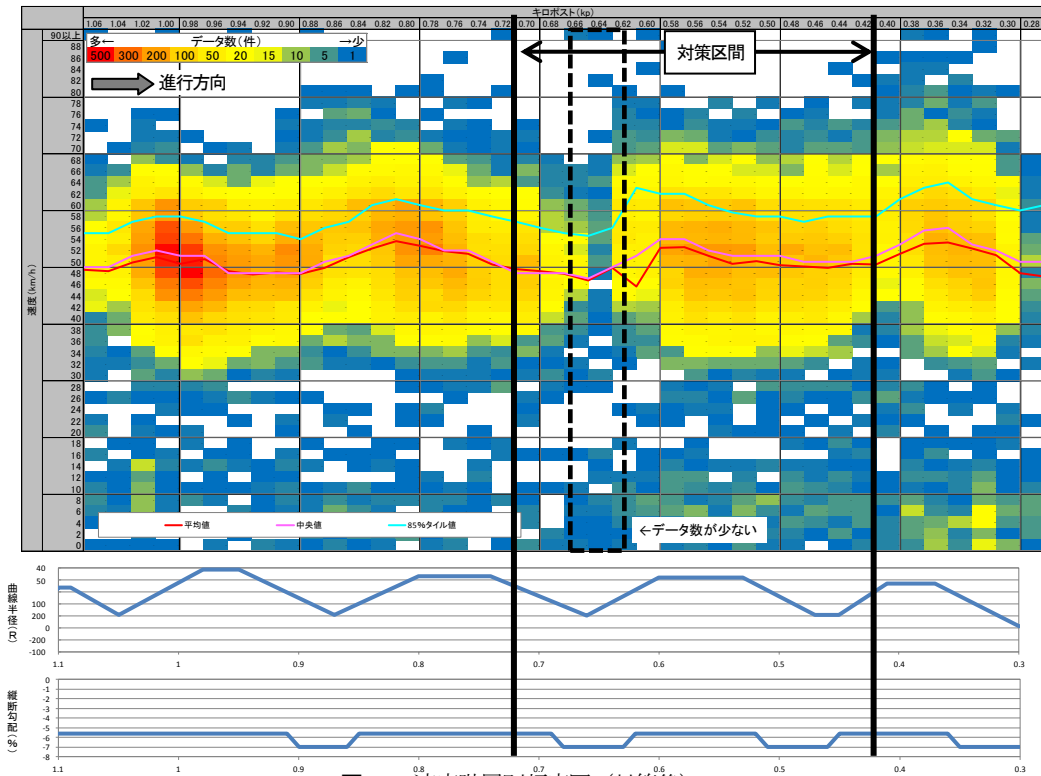


図-24 速度階層別頻度図 (対策後)

対策前後における中央値と85%タイル値の速度状況を比較したものを図-25に示す。中央値、85%タイル値ともに対策後の方がわずかながらに速度が上昇する傾向がみられるが、ほとんどの場所で1km/h程度の上昇幅となっている。

また、速度階層別に対策前後のサンプル数の比率の差を示したものを図-26に示す。サンプル数の比率の差が大きくなっているのは概ね50km/h以上の速度域が中心で

あり、サンプル数の比率の差が小さくなっているのは、概ね50km/h未満の速度域が中心である。そのため、対策後の方が速度がやや上昇傾向になっていることが考えられる。一方で、50km/h以上の速度域のサンプル数の比率の差が対策区間の手前から対策区間の直前にかけて、小さくなっていることから、対策後はカーブ直前において速度を落としている車両が増加していることが考えられる。

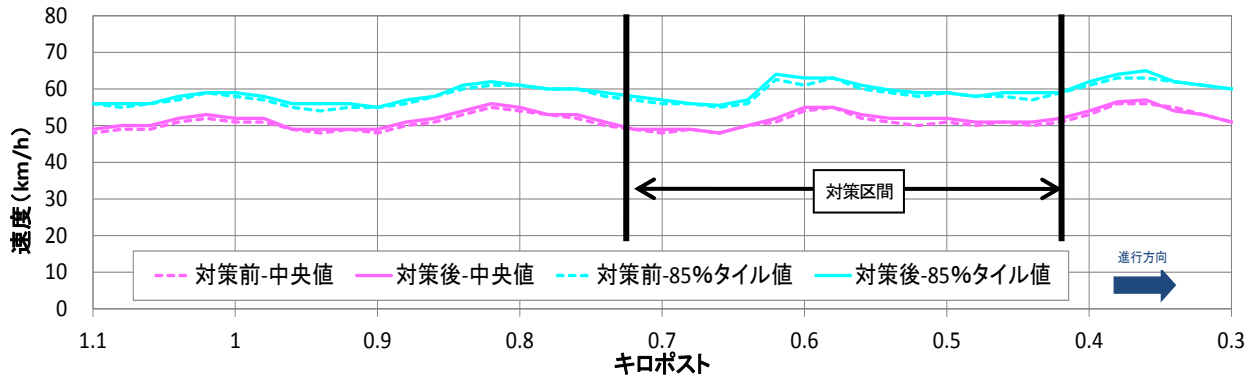


図-25 中央値-85%タイル値 速度変動図

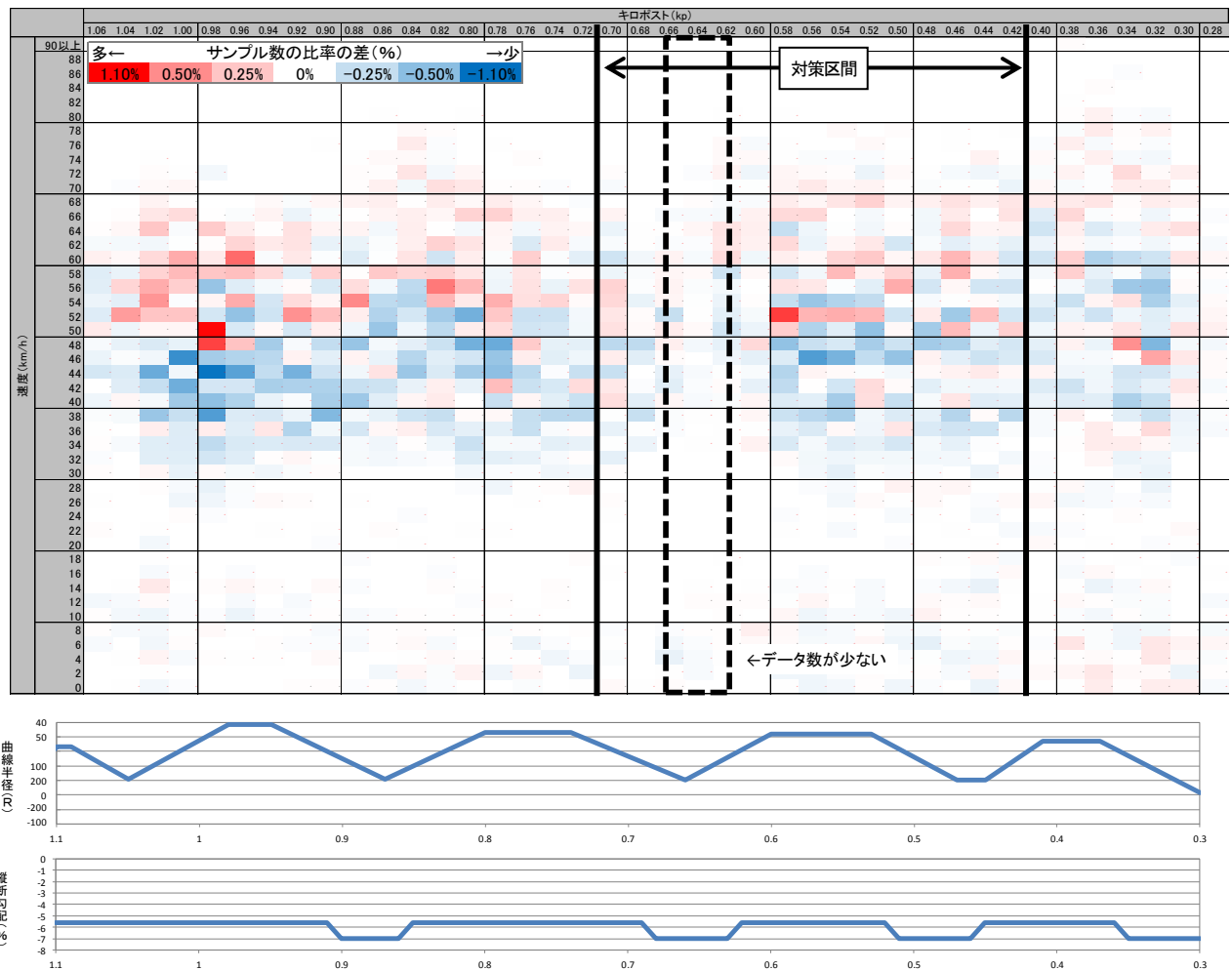


図-26 速度階層別サンプル数比率差 (対策後-対策前)

(3) ETC2.0プローブデータ（急減速・急ハンドル）

a) 大橋JCT下り勾配対策施工区間全体

ETC2.0プローブデータより集計した大橋JCT下り勾配注意喚起カラー舗装施工区間における急減速・急ハンドルの発生状況を図-27から図-29に示す。なお、本稿では急減速の定義を0.3G~1.0G，急ハンドルの定義を左右加速度は0.3G~1.0G，ヨー角速度は8.5deg/s~30.0deg/sとした。

減速の出現頻度は，図-27に示すとおりである。急減速の発生回数は1万台当たり577件→484件と2割弱減少している。

左右加速度から見る急ハンドルの出現頻度は，図-28に示すとおりである。急ハンドルの発生回数は1万台当たり1,906件→1,833件と4%程度減少している。

ヨー角速度から見る急ハンドルの出現頻度は，図-29に示すとおりである。急ハンドルの発生回数は1万台当たり5,214件→5,149件と左右加速度とは違い，1%程度の減少にとどまる。

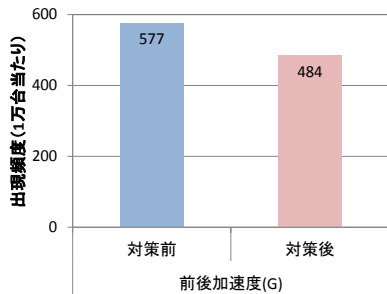


図-27 急減速（前後加速度）の出現頻度

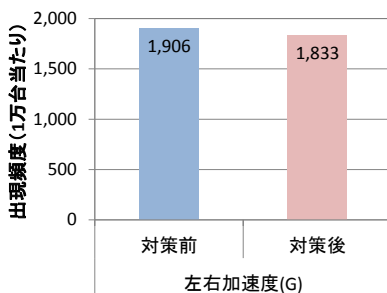


図-28 急ハンドル（左右加速度）の出現頻度

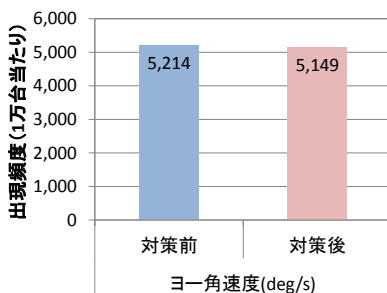


図-29 急ハンドル（ヨー角速度）の出現頻度

b) 指標値域別出現頻度

注意喚起カラー舗装施工区間における前後加速度の強さ別に見た急減速の発生状況は，図-30に示すとおりである。急減速の出現頻度（棒グラフ）は，概ね対策後の方が減少傾向にある。特に0.3~0.55Gの間については特に減少幅が大きい。ただし，各前後加速度の累積頻度（折れ線グラフ）はほとんど同じである。

左右加速度から見た急ハンドルの発生状況を図-31に示す。左右加速度から見る急ハンドルの出現頻度（棒グラフ）についても概ね対策後の方が減少傾向にある。特に0.3~0.45G部分の減少幅が大きい。なお，0.55G以上については対策前後で出現頻度が変わっていない。そのため，累積頻度（折れ線グラフ）は対策後の方が比較的小さいGの割合が小さくなる傾向にある。

ヨー角速度から見た急ハンドルの発生状況を図-32に示す。対策前後では，出現頻度および累積頻度ともに大きな変化は見られない。

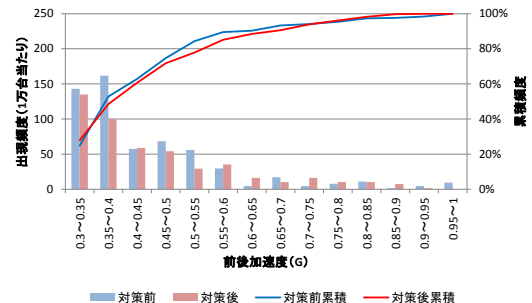


図-30 大橋JCT下り坂急減速発生状況

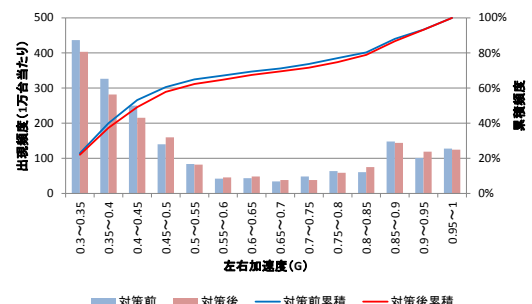


図-31 大橋JCT下り坂急ハンドル発生状況（左右加速度）

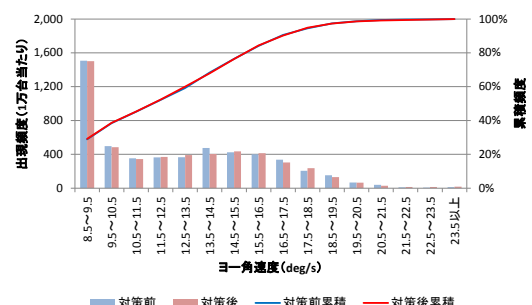


図-32 大橋JCT下り坂急ハンドル発生状況（ヨー角速度）

c) キロポスト別急減速・急ハンドル発生状況

キロポストごとに、急減速や急ハンドルの状況を整理したものを図-33に示す。

キロポストごとに多少のばらつきは見られるものの、急減速挙動については、事故多発箇所である0.57kp前後及び0.35kp前後の発生回数が減少傾向であることが確認できる。なお、両地点とも一度カーブが緩くなった後、再び急になった地点という共通点がある。

また、急ハンドル操作（左右加速度・ヨー角速度）も件数が多くなっているのは事故多発箇所である0.57kp前後及び0.35kp前後で発生回数が多くなっている傾向にある。特に、左右加速度に着目すると、対策後の方が急ハンドル回数がやや減少傾向にあることが確認できる。

(4) 対策効果分析まとめ

車両感知器データ、およびETC2.0プローブデータを分析することで、車両挙動面における注意喚起カラー舗装の対策効果分析を行った。分析の結果をまとめると以下に示す通りとなる。

- ・ 車両感知器データでは、対策前後で速度状況にはほぼ変化はみられない

- ・ ETC2.0プローブデータの分析でも、速度状況は対策前後でほぼ変化ない、またはわずかに速度が上昇傾向であると考えられる
- ・ 急減速挙動は対策後の方が約1割減少している
- ・ 急ハンドル操作（左右加速度）についても、対策後の方が約4%減少している

以上のことから、大橋JCTで実施された注意喚起カラー舗装については、速度抑制に対する効果の発現は確認できないものの、急減速や急ハンドル操作の抑制につなげることができている。

これらの結果になっている理由としては、注意喚起カラー舗装を実施する際、あわせて舗装を打ち換えているため、すべり摩擦係数が増加し、カーブ部で滑りにくい環境になり、安定した走行ができるようになったことが考えられる。

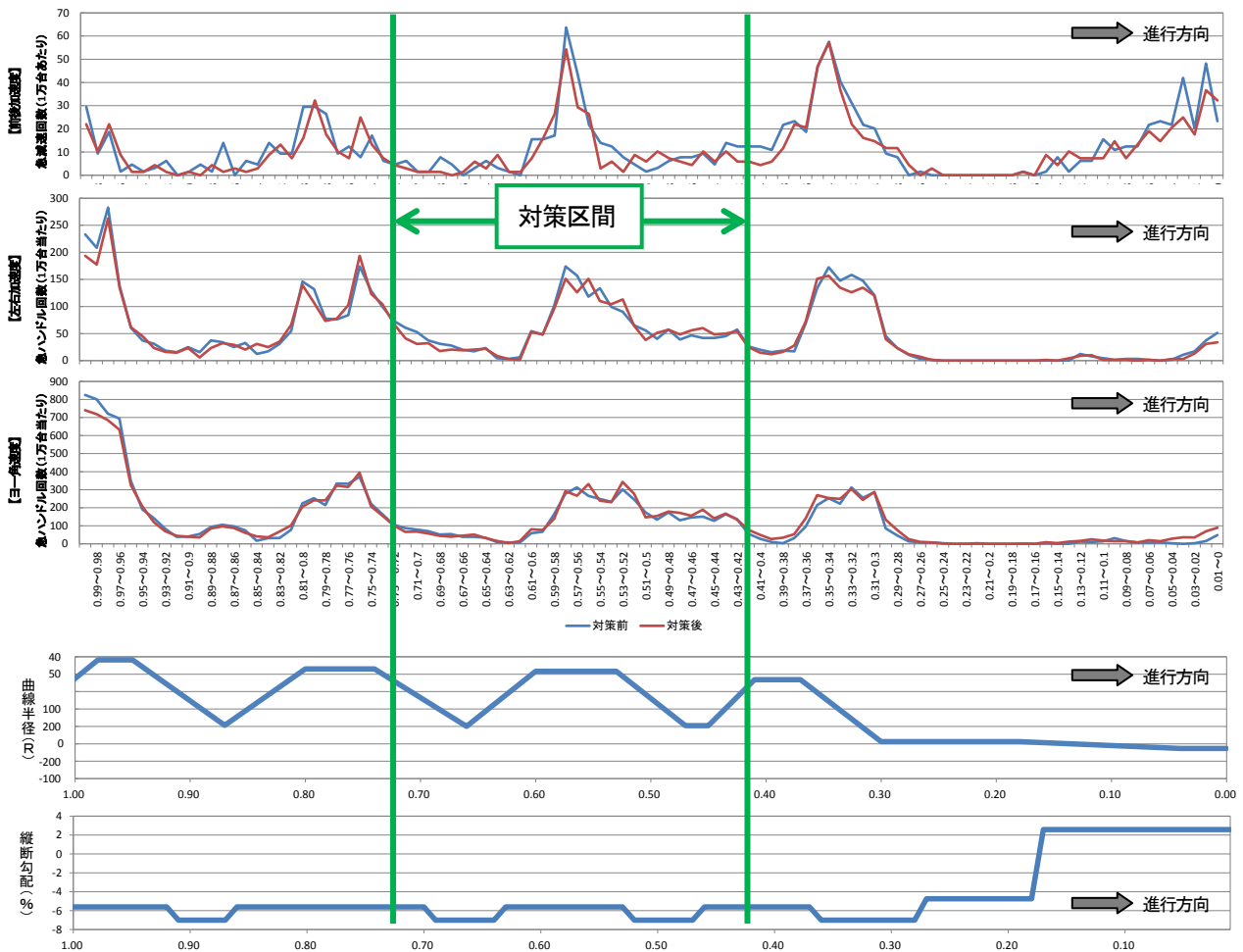


図-33 キロポスト別急減速・急ハンドルの発生状況（上から急減速，急ハンドル（左右加速度），急ハンドル（ヨー角））

5. おわりに

大橋JCT下り坂勾配部で行われた注意喚起カラー舗装を対象として、車両感知器データおよびETC2.0プローブデータを使用して、車両挙動面からみた対策効果分析を行った。

その結果、対策実施により速度は低下していないものの、急減速や急ハンドル操作が減少したことが確認された。このような結果になった理由は、注意喚起カラー舗装を行う際に舗装を打ち換えているため、すべり摩擦係数が増加し、カーブ部で滑りにくい環境になったことなどが考えられる。

しかしながら、注意喚起カラー舗装の対策実施後も、依然として速い速度で大橋JCT下り勾配部を通過している状況である。今後の課題として、大橋JCT下り勾配部については、再び事故が発生しないように、また事故発生リスクを少しでも低下させるために、速度抑制策の検討を行っていく必要がある。

参考文献

- 1) 川野祥弘，猪原拓也：注意喚起カラー舗装による事故削減効果，第30回日本道路会議，2013
- 2) 堀田尚史，遠藤学史，清野勝，山下浩行，島崎雅博：ETC2.0 プローブ情報を活用した注意喚起カラー舗装の対策効果に関する一考察，第35回交通工学研究発表会論文集（実務論文），2015