

高速道路合流部における本線走行車両の減速開始地点分布に関する考察*

Distribution of Deceleration Starting Point of Vehicle on Main Lane at the Merging Part of Expressway *

飯田克弘**・隅本雄一***

By Katsuhiko IIDA**・Yuichi SUMIMOTO***

1. はじめに

高速道路において合流部は渋滞発生箇所にも占める割合が高く、合流部における渋滞対策は重要な課題となっている。これに対し、現場では加速車線延伸といった対策が取られている²⁾ほか、走行支援システムの導入も検討されている³⁾。これらの対策・検討は、可能な限り効率的な実施が望まれるが、そのためには、合流部における交通挙動メカニズム、つまり様々な要因によって相互に影響を受ける合流車両と本線車両の挙動の把握が必要となる。

合流部における交通挙動を対象とした既往研究として、喜多らは合流部における交通現象をゲーム理論の適用によりモデル化し、車両の挙動変化を表現した⁴⁾。また宇野ら⁵⁾はファジィ理論を適用し、合流車両の影響を受ける本線車両の加速度調整モデルの構築を行っている。また筆者らは、ドライビング・シミュレータ（以下DS）を用いた走行実験を行うことにより、加速車線長の違いによる合流車両、本線車両の挙動変化を分析し、加速車線を延伸した場合、合流車両の観点からは挙動の自由度が増すこと⁶⁾、本線車両の観点からは減速波の伝播が緩和されることを確認している⁷⁾。これらの研究では、合流車両が高速道路本線に流入する時点での挙動に焦点を当てているが、実際には、合流ノーズよりかなり上流で避走や減速が見られることから、渋滞対策の観点からはもう少し広い範囲で合流部を対象とした本線車両挙動特性の把握が必要であると考えられる。

また、いずれの既往研究においても、本線車両に影響を及ぼす要因を特定し、その上で本線車両の挙動を把握することが課題として残っている。

以上を踏まえて、本研究ではノーズ端上流から高速道路合流部を捉え（図-1参照）、特に本線車両の挙動特性

の把握を、挙動に影響を与える要因の特定を念頭において行うことを目的としている。また詳細は後述するが、本稿では、本線車両がとり得る様々な挙動のうち減速挙動に着目し、特に減速開始地点とその要因について検討する。具体的には、まず先行研究⁷⁾により取得したデータに基づいて本線車両の減速開始地点の分布を求め、その分布に影響を及ぼす要因について考察する。次に、先行研究⁷⁾と同様の条件で走行実験を行い、得られた実験結果を用いて、先に得られた知見を確認する。

2. 先行研究データに基づく本線車挙動特性把握

(1) データの概要

先行研究⁷⁾では、東名高速道路下り線三好IC合流部付近（図-1参照）を対象区間とし、室内実験によって加速車線長の変化による合流ギャップ後方車両（合流車が合流したギャップの後方車両）以降の車群の動きを調査している。この実験結果のうち、加速車線長200(m)（現道と同じ長さ）、自車周辺車両の交通密度26.7(台/km)の条件で、自車周辺車両の初期配置が異なる2場面における合流ギャップ後方車両のデータを用いて本線車両の挙動を概観することとした。

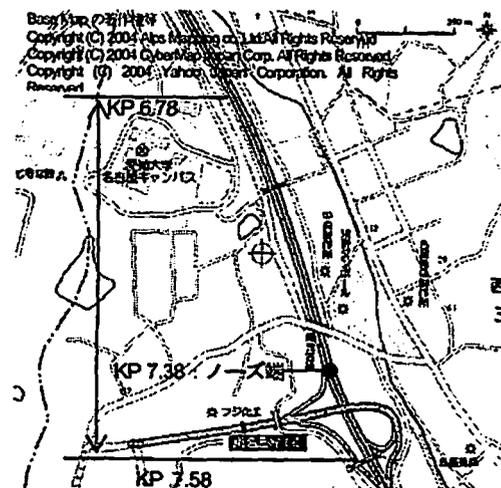


図-1 対象区間

*Keywords : 道路計画, 合流部, ドライビング・シミュレータ

**正員, 博士(工), 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻
〒565-0871 吹田市山田丘2-1

TEL : 06-6879-7611 FAX : 06-6879-7612

***学生員, 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻

なお先行研究⁷⁾では、対象区間の渋滞発生直前1時間

分のビデオ映像から、全ての合流場面について、本線の交通密度と空間平均速度を算出し(図-2), サンプル数が確保できること、渋滞対策を考える上でできるだけ混雑した状況を対象とするという観点から、26.7(台/km)という交通密度を採用している。本研究も冒頭に示したとおり渋滞対策を念頭においていることから先行研究に準拠して同じ交通密度を条件として採用した。

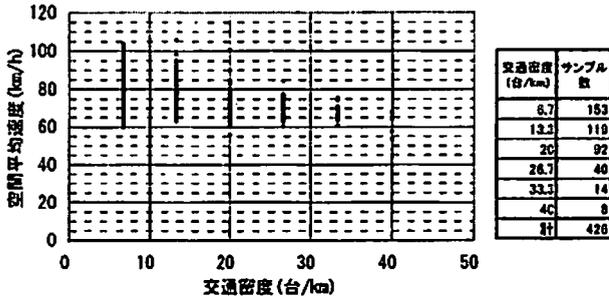


図-2 対象区間の交通密度と空間平均速度⁷⁾

また初期配置が異なる2場面は図-2中26.7(台/km)のカテゴリから無作為に抽出されたものであり、被験者が運転する車両の周辺は図-3, 図-4の通りとなっている。なお実験の被験者は運転免許取得歴1年以上の20代前半の男子学生30名であり、60サンプルのデータを使用することとなる。

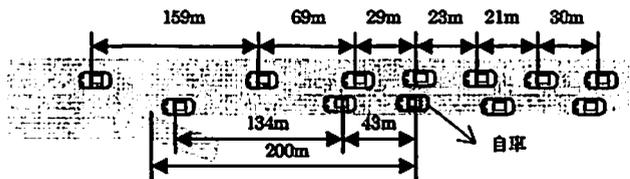


図-3 自転車および周辺車両の初期位置 (場面1)

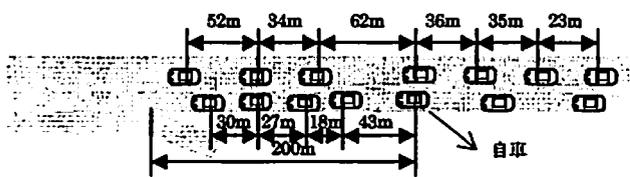


図-4 自転車および周辺車両の初期位置 (場面2)

(2) 本研究で分析対象とする本線走行車の挙動

上述のデータを用い、時間(s)軸上に速度(km/h), 加速度(m/s²), アクセル使用量(%)の推移図を作成した(図-5)。この推移図を用いて、本線車両の挙動パターンの分類を行ったところ、以下のパターンが得られた(カッコ内は該当サンプル数/全サンプル数)。なお、分類の対象とする本線車両の挙動は、実験走行開始時点から、合流車の合流が完了する時点までのものとした。また分類にあたっては、本線車の加速度の絶対値 0.5(m/s²)を減速・加速の判断基準とした。

- ・ 加減速を行わない (9/60)
- ・ 減速し合流車両を受け入れる (40/60)

- ・ 加速し合流車両を追い越す (2/60)
- ・ 車線変更する (9/60)

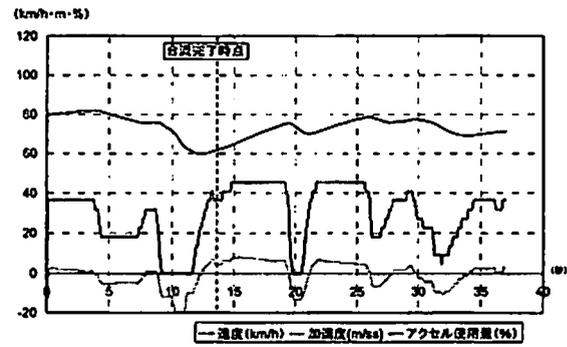


図-5 速度推移図例

本稿では、選択割合が高く、渋滞発生との関係が考えられることから、減速し合流車両を受け入れる挙動(以下、減速挙動)に着目することとした。また1.で述べた通り、合流部を広い範囲で捉えた研究例は多くないことから、本線車両が減速を開始した地点(以下、減速開始地点)の分布と、分布に影響を与える要因について考察することとした。

(3) 減速開始地点の分布とその要因分析

(a) 減速開始地点の分布

上述のデータを用いて、減速開始地点分布を求めた(図-6)。この結果より、本線車両の減速開始地点は対象区間に広く分布していることが分かる。上流区間においては、本線車両ドライバーは合流車両との相対関係を把握しづらいと考えられるが、それにも関わらず減速を行っているということは、合流車両を視認するという行為そのものが減速に影響を及ぼしている可能性がある。そこで、減速開始地点と視認開始地点(本線車両ドライバーが合流車両を初めて視認した地点)との関連性を分析することとした。なお本研究では、実験時に記録されていたアイマークレコーダのデータを使用し、運転者の視線が合流車に向けられている状態が165(ms)以上続く場合を注視とし⁸⁾、視認開始地点を算出した。

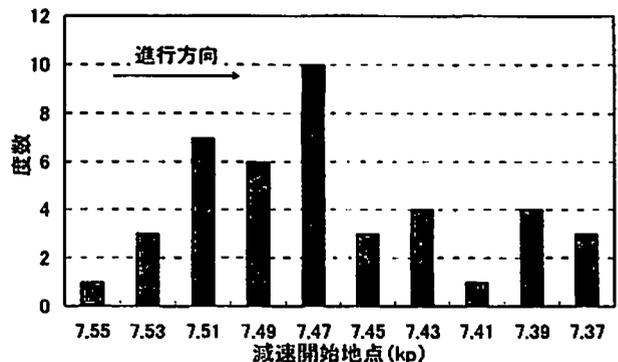


図-6 減速開始地点の分布

(b) 減速開始地点と視認開始地点との関連性分析

横軸を減速開始地点、縦軸を視認開始地点とした散布図を作成し(図-7)、クラスター分析を行った結果を併せて示した。

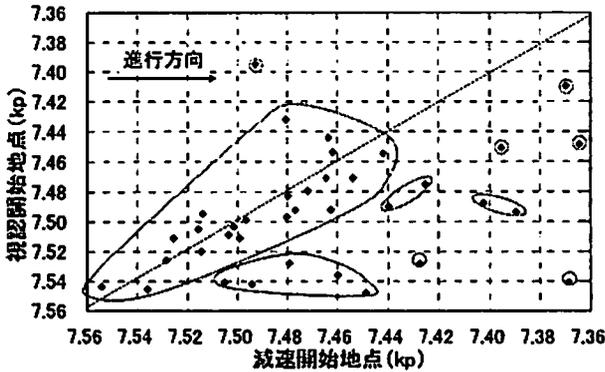


図-7 減速開始地点と視認開始地点との関係

図-7より、減速開始地点と視認開始地点が同程度となる直線上に最大のクラスターが存在することが確認できる。このクラスターに関して相関分析を行ったところ、相関係数 0.82、無相関検定の有意確率 0.00 と非常に高い相関が得られた。このことから、このクラスターにおいて、本線車両は視認開始地点で減速を開始している可能性が高いと考えられる。

ここで、図-7に示した結果では、実験で用いられた初期配置の異なる場面のサンプルが混在している。視認開始地点に関する特性を把握するため、場面ごとに分布図を作成した(図-8)。

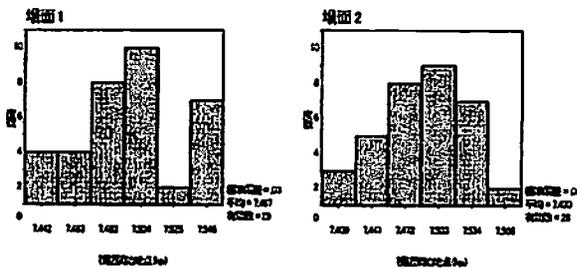


図-8 視認開始地点の分布

図から、視認開始地点の平均値は各場面とも 7.5kp 付近になることが分かる。そこで、Kolmogorov-Smirnov 検定(有意水準 5%)によって二つの分布の正規性を確認した後(表-1)、t 検定(有意水準 5%)により平均値の差の検定を行った。その結果、検定統計量 0.79、有意確率 0.43 となり、二つの分布の平均値に有意な差が認められないことが分かった。周辺車両の配置が変わった場合、運転者の視線・注視もそれに応じて変わる可能性があるが、合流車両の視認はそれに左右されない、すなわち地点固有のものであることを示唆する結果が得られた。

表-1 視認開始地点分布の正規性検定結果

	統計量	自由度	有意確率	帰無仮説
場面1	0.097	29	0.20	棄却されない
場面2	0.099	28	0.20	棄却されない

(c) 減速開始地点と車間距離との関連性分析

視認開始地点以外に本線車両の減速開始地点に影響を及ぼす可能性のある要因を考察した。既往研究 5)において、本線車両の挙動は合流車両との相対速度および車間距離に影響されると示されている。ここで、本研究が対象とする区間では、加速車線長 200(m)、周辺車両の交通密度 26.7(台/km)の条件では、合流位置の平均はノーズ端から 87.4(m)下流、合流車両の本線車両に対する合流時速度比の平均は 1.05 となることから先行研究 6)の結果から分かっている。このことから、少なくとも今回のケースでは、本線車両のドライバーが、合流車両との相対速度を十分に感知できる状況ではないと仮定し、本稿では車間距離が減速開始地点に与える影響について検討することとした。

減速開始地点と車間距離との関連性を分析するため、本線車両が減速を開始した時点における、本線車両と合流車両との車間距離と、本線車両が通常取り得る車間距離のパーセントタイル値とを比較した(図-9)。

なおここでの車間距離は、本線車両の進行方向軸上における合流車両の車尾から本線車両の車頭までの距離とし(図-10)、本線車両が通常取り得る車間距離については、合流完了時点から実験走行終了時点までの約 600(m)間における本線車両と前走車両との車間距離を計測し、この範囲の値とした。

まず、減速を行った 40 サンプル全てについて図化した上で、(b)で指摘したクラスター以外の部分に着目しその傾向を考察した。図-9 から、7.47~7.45(kp)より下流で、0 パーセントタイル値より小さい車間で減速を開始する、つまり、本線車両と合流車両との車間距離が、本線車両が通常取り得る車間距離より短くなってから減速を開始するものが高い割合(9/12)で確認できる。

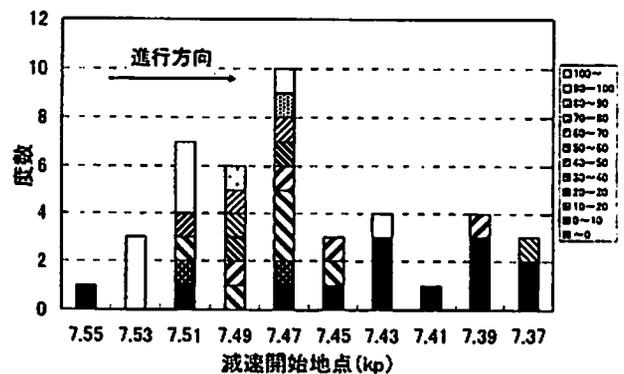


図-9 減速開始地点別のパーセントタイル値の分布

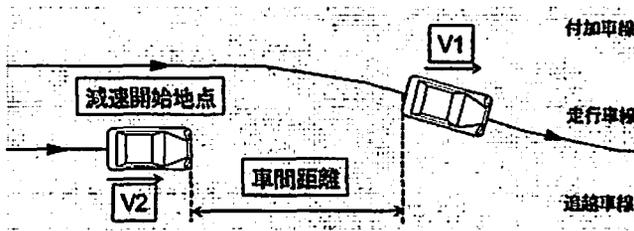


図-10 車間距離模式図

(4) 要因分析を行う上での課題と追加実験の必要性

以上の結果から、本線車両の減速開始地点に影響を及ぼす要因は、上流区間で減速開始地点が視認開始地点と同程度となる付近では視認開始地点、それより下流では合流車両との車間距離、特に本線車両が通常取り得る車間距離より短くなった状態が要因となる可能性が示唆された。ただし、サンプル数は40と少なく、十分な根拠が得られているとは言えない。

また、以上の結果の妥当性を確認するには、運転者の意思決定過程を把握できる調査を行い、運転者の運転意識と上記結果との整合性が確認される必要がある。

以上の理由から、本研究では先行研究7)の実験と同条件での追加実験を行うこととした。なお、追加実験時にはプロトコル分析法^{9, 10}を準用した調査を併せて行うこととした。プロトコル分析法とは、被験者への質疑応答や対話により、その人の考えや感じたことを抽出し検討する手法である。この手法を用いることにより、ドライバーの意思決定過程、すなわち注視（何を見て）→認知（何が分かり）→評価・感情（どのように判断し）→行動結果という流れを把握する。

3. 本線車両としての走行実験（追加実験）

追加実験の対象区間、実験条件は先行研究7)における実験と同様であり、加速車線長200(m)、周辺車両の交通密度を26.7(台/km)とした状況で、ドライビング・シミュレータ(図-11)を用いて本線車両として走行実験を行った。このドライビング・シミュレータでは、正面120inch、左右150inchのスクリーンに前方および側方映像が投影され、サイドミラーおよびバックミラーの役割を果たす3台の液晶ディスプレイに後方風景の映像が表示される。これによって、正面から被験者の頭の位置までの距離が2mの場合、周辺視を含めた200°以上の広範囲の視野角を確保できるとともに、ミラーによる後方の交通状況も確認することができる。

なお周辺車両の初期配置は、サンプルの増加をねらい6場面用意した。このうち2場面は先行研究7)と同じであり、他の4場面は図-2中26.7(台/km)のカテゴリーから無作為に抽出したものをを使用した。

被験者は、先行研究での被験者とは異なる運転免許取

得歴1年以上の20代前半男子学生30名とし、以下に示す手順で走行実験を行った。

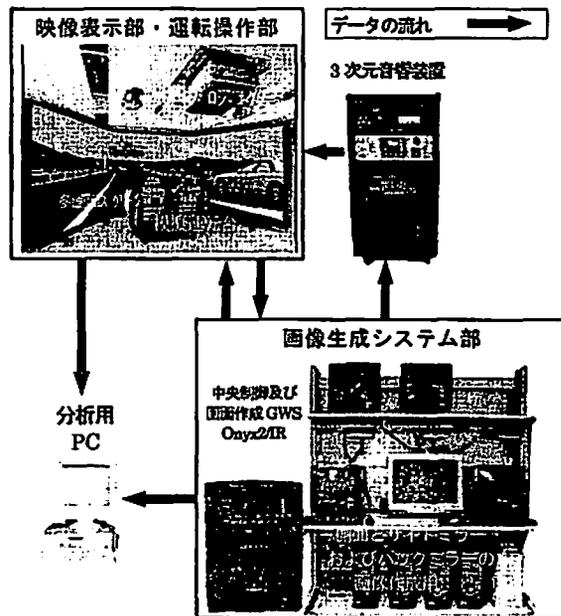


図-11 ドライビング・シミュレータの構成

事前説明

被験者に対し、実験直前に文書と口頭にて実験の目的、実験概要、実験走行時の注意事項等の説明を行った。説明終了後、被験者をドライビング・シミュレータの運転席に着座させ、機器取り扱いの説明を行った。

練習走行

被験者がドライビング・シミュレータでの運転を習熟することを目的として、以下に示す3パターンでの練習走行を行った。

- ・練習走行1：単路部、周辺車両なし（アクセル、ブレーキの操作感覚、速度感等に慣れるための練習）
- ・練習走行2：単路部、周辺車両あり（初速度にあったアクセルの踏み込み、ミラーの見え具合および周辺車両がある状況での走行に慣れるための練習）
- ・練習走行3：合流部、周辺車両あり（実験区間と異なる区間を用いて、合流車がある状況での走行に慣れるための練習）

実験走行

アイマークレコーダを装着し、走行時の注意事項を再度確認した後、実験走行を開始した。実験映像として提示する場面は、その提示順による影響を抑えるため、各被験者についてランダムに提示した。なお、実験では以下に示すデータを収集した。

- ・走行地点 (kp)
- ・車線内走行位置 (m)
- ・アクセル使用量 (%)
- ・ハンドル回転角 (°)
- ・前方車両との車間距離 (m)
- ・走行速度 (km/h)
- ・ブレーキ使用量 (%)
- ・視線座標

プロトコル分析法を準用したヒアリング調査

・実験終了後、被験者にプロトコル分析法を準用したヒアリング調査（以下、プロトコル調査）を行った。なお調査は、走行中に録画した前方映像を被験者に見せながら、以下に示す挙動が現れた場面について、注視対象、認知内容、評価・感情経験、行動決定理由を質問した。

- ・走行開始後、初めて合流車を注視する行動
- ・5m/ss 以上の加速度の低下
- ・10%以上のアクセル使用量の低下
- ・ブレーキの使用

4. 実験データ分析

(1) 減速開始地点と視認開始地点との関連性分析

2.と同様、まず減速開始地点と視認開始地点との関連性を分析するため、クラスター分析を行った（図-12）。

その結果、減速開始地点と視認開始地点が同程度となるライン上に最大のクラスターの存在が確認できた。このクラスターに関して相関分析を行ったところ、相関係数 0.52、有意確率 0.00 と、正の相関があるという結果が得られた。減速開始地点の分布も 7.57kp~7.44kp と、2.(3)(b)の結果とほぼ同範囲となっている。つまり、本研究での対象区間において、この範囲の視認開始地点で減速を開始する本線車両が多いと考えられる。

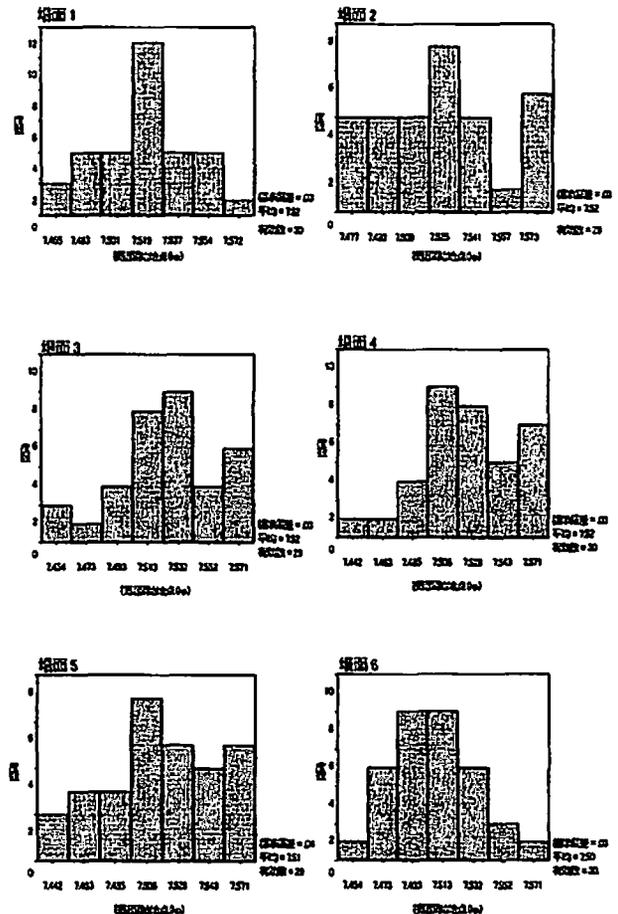


図-13 視認開始地点の分布

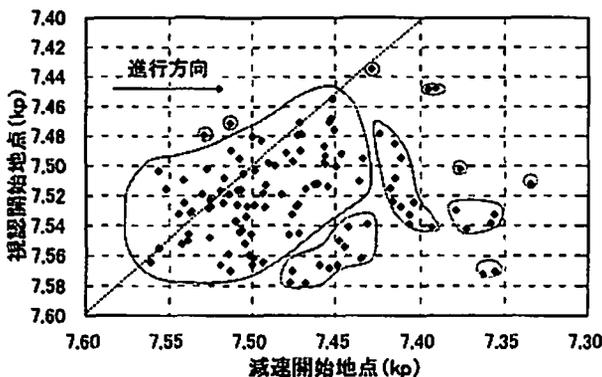


図-12 減速開始地点と視認開始地点との関係

ここで、2.(3)(b)と同様に、実験で使用した周辺車両の配置が異なる6場面について、視認開始地点の分布を作成した（図-13）。この結果から、Kolmogorov-Smirnov 検定（有意水準 5%）によって各分布の正規性を確認した後（表-2）、t検定（有意水準 5%）により場面間の平均値の差の検定を行った（表-3）。検定の結果、場面3-場面6、場面4-場面6を除いた全ての場面間において、平均値の有意差は認められなかった。つまり、周辺条件の異なる場面においても、視認開始地点の分布特性は同様になるという2.(3)(b)の知見が確認された。

表-2 視認開始地点分布の正規性検定結果

場面	統計量	自由度	有意確率	帰無仮説
場面 1	0.11	30	0.20	棄却されない
場面 2	0.10	29	0.20	棄却されない
場面 3	0.09	29	0.20	棄却されない
場面 4	0.11	30	0.20	棄却されない
場面 5	0.08	29	0.20	棄却されない
場面 6	0.10	30	0.20	棄却されない

表-3 視認開始地点の平均値に関する差の検定結果

	統計量	有意確率	帰無仮説
場面1-場面2	-0.55	0.58	棄却されない
場面1-場面3	-0.88	0.38	棄却されない
場面1-場面4	-1.27	0.21	棄却されない
場面1-場面5	0.19	0.85	棄却されない
場面1-場面6	1.58	0.12	棄却されない
場面2-場面3	-0.32	0.75	棄却されない
場面2-場面4	-0.67	0.51	棄却されない
場面2-場面5	0.65	0.52	棄却されない
場面2-場面6	2.02	0.05	棄却されない
場面3-場面4	-0.34	0.74	棄却されない
場面3-場面5	0.93	0.36	棄却されない
場面3-場面6	2.33	0.02	棄却される
場面4-場面5	1.25	0.22	棄却されない
場面4-場面6	2.75	0.01	棄却される
場面5-場面6	1.11	0.27	棄却されない

(2) 減速開始地点と車間距離との関連性分析

次に、減速開始地点と車間距離との関連性を分析した。具体的には、2.(3)(c)と同様に、本線車両が減速を開始した時点における、本線車両と合流車両との車間距離と、本線車両が通常取り得る車間距離のパーセントイル値とを比較した(図-14)。

図-14 から、7.45(kp)より下流に関して、0パーセントイル値より小さな車間、言い換えると、本線車両と合流車両との車間距離が、本線車が通常取り得る車間距離より短くなってから減速を開始するものが高い割合(29/69)で確認できる。以上のことから、減速開始地点が視認開始地点と同程度となる付近より下流区間では合流車両との車間距離、特に本線車両が通常取り得る車間距離より短くなった状態が減速開始地点に影響を及ぼす要因となる可能性が確認された。

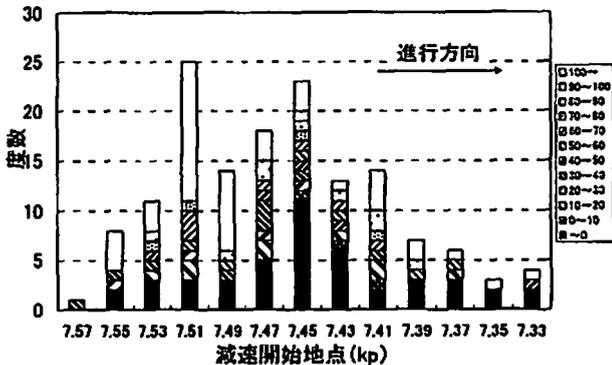


図-14 減速開始地点別のパーセントイル値の分布

(3) プロトコル調査を用いた減速挙動の要因分析

プロトコル調査結果から、減速時における本線車ドライバーの意思決定過程を把握するため、得られた発話を集計した(表-4)。また、この発話パターンを、減速開始地点と視認開始地点の散布図上に示した(図-15)。

まず表-4中の減速時の認知内容に注目すると、合流車との距離が近いことを示す発話が多く確認できる。本研

究では2.(3)(c)で、少なくとも今回のケースでは、本線車両のドライバーが、合流車両との相対速度を十分に感知できる状況ではないと仮定して研究を展開したが、この仮定が妥当なものであることが示されたと考える。

表-4、図-15 から、減速開始地点が視認開始地点と同程度となる付近より下流区間では、「合流車両を注視し、合流車両との距離が近いことを認知し、車間距離をあげようと、意識的に減速した」パターン1が多く見られる。一方、減速開始地点が視認開始地点と同程度となる付近では、合流車両が注視されているものの、合流車両の存在が認知されているに留まり、減速も意識的に行われていない場合が含まれていることが分かる。

また、実験データ分析により減速開始地点に影響を及ぼす要因が把握できなかった部分(図-15 中囲み部分)について、発話パターン2:「合流車が自車より前を走行しているから、前に入れよう」が多数(8/11)確認できる。この行動の場合、合流車両が確認できたら無条件で譲るのか、それとも車間距離など表現されていない条件があるのかについては今後精査が必要であるが、今回は要因として「合流車を前に入れようとする意思」を視認開始地点、車間距離と区別して整理することとする。

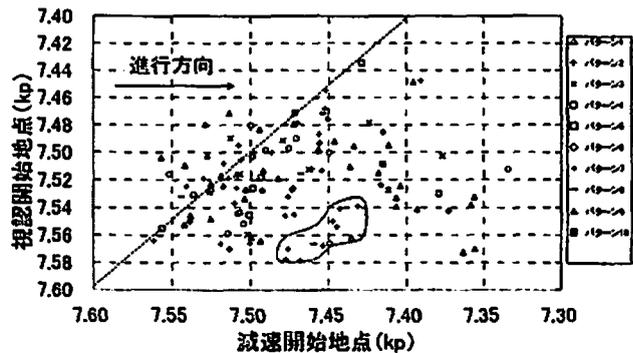


図-15 プロトコル調査結果(散布図)

表-4 プロトコル調査結果

発話パターン	注視対象	認知内容	評価・感情経験	サンプル数
【合流車(意図して減速したもの)】				
パターン1	合流車	合流車との距離が近い	車間距離を広げよう	43
パターン2	合流車	合流車が自車より前を走行している	前に入れよう	33
パターン3	合流車	合流車が流入してくる	速度を落とそう	12
パターン4	合流車	合流車が流入してくる	譲ろう	6
パターン5	合流車	その他	その他	9
【合流車(意図せず減速したもの)】				
パターン6	合流車		無意識	10
パターン7	合流車	合流車が流入してくる	拍子に	4
パターン8	合流車		なんとなく	3
パターン9	合流車	合流車の速度が分からない	注意がそれた	2
パターン10	合流車	合流車との距離が近い	あわてた	2
【合流車以外】				
パターン11	追越車線	交通量が多い	避走できない	11
パターン12	合流車と前走車	前走車との距離が近い	車間距離を広げよう	8
パターン13	前走車	距離が近い	車間距離を広げよう	4
パターン14	その他	その他	その他	4

5. まとめ

本研究では、高速道路合流部における本線車の交通挙動メカニズムを解明することを目的に、本線車両がとり得る様々な挙動のうち減速挙動に着目し、特に減速開始地点とその要因について検討した。その結果、対象とした区間では、本線車の減速開始地点に影響を及ぼす要因は①視認開始地点、②車間距離、③合流車を前に入れようと言う意思発生であるという知見を得た。また、視認開始地点について、周囲の車両配置によらず、7.50～7.52kp（合流ノーズ端から120～140(m)上流）に平均を持つ正規分布となることも分かった。

ここで図-16 に図-12 で使用したサンプルの減速開始地点と減速値を示す。この2項目には、相関係数0.16、有意確率0.045と弱い負の相関関係にあるという結果が得られた。つまり対象とした区間では、大きな減速が生じやすい上流側に減速開始地点が集中する傾向があると解釈することができ、渋滞対策を検討する上で参考となる知見も併せて得ることができた。

今後は異なる合流部で同様の分析を行い、本研究で得られた知見を確認すると同時に、減速挙動以外の挙動についても分析を進める予定である。

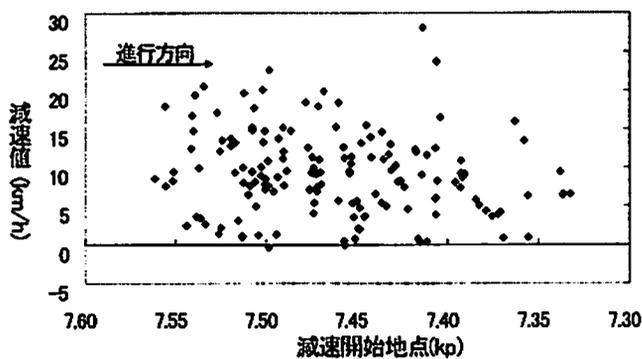


図-16 減速開始地点と減速値

参考文献

- 1) 岡村秀樹・渡辺修治・泉正之：高速道路単路部の交通容量に関する調査研究，高速道路と自動車，第44巻，第2号，2001.
- 2) 尾上一馬・米川英雄・榎永清：付加車線の設置効果，交通工学，vol.33，No.6，pp.49-58，1998.
- 3) 清水哲夫・飯島雄一・屋井鉄雄：高速道路合流部における走行支援情報提供に関する一考察，土木計画学研究・論文集，Vol.19，No.4，pp.839-846，2002.
- 4) 喜多秀行・幸坂謙之介・福山敬：流入・避走行動の相互依存性を考慮した高速道路流入部のマクロ走行特性推計法，土木計画学研究・論文集，Vol.18，No.5，pp.903-908，2001.
- 5) 宇野伸宏・飯田恭敬・安原真史・菅沼真澄：一般道織込み部における客観的コンフリクト分析と速度調整モデルの構築，土木計画学研究・論文集，Vol.20，No.4，pp.989-996，2003.
- 6) 飯田克弘・隅本雄一・巽義知・安時亨・逢坂光博：VR技術の適用による合流部付加車線延伸効果の検討，土木計画学研究・講演集，Vol.30 (on CD-ROM)，2004.
- 7) 飯田克弘・巽義知・隅本雄一：合流部付加車線延伸時の本線車両の挙動解析，土木計画学研究・講演集，Vol.32 (on CD-ROM)，2005.
- 8) 門間健・岩崎征人・古市朋輝：都市高速道路S曲線部における注視挙動と運転行動，土木計画学研究・講演集，Vol.26(1) (on CD-ROM)，2002.
- 9) 海保博之・加藤隆：プロトコル分析入門，福村出版，1999.
- 10) 吉川聡一・高木修：運転行動の意思決定過程に関するプロトコル分析，交通科学，Vol.26(1)pp.79-80，1997.