

Newell型モデルのパラメータ推定による 時間帯別の車両追従挙動分析

吉田 光太郎¹・中西 航²・朝倉 康夫³

¹学生会員 東京工業大学 環境・社会理工学院 (〒 152-8552 目黒区大岡山 2-12-1)
E-mail: k.yoshida@plan.cv.titech.ac.jp

²正会員 東京工業大学助教 環境・社会理工学院 (〒 152-8552 目黒区大岡山 2-12-1)
E-mail: nakanishi@plan.cv.titech.ac.jp

³正会員 東京工業大学教授 環境・社会理工学院 (〒 152-8552 目黒区大岡山 2-12-1)
E-mail: asakura@plan.cv.titech.ac.jp

道路線形、通行する車種やドライバーが多様な都市高速道路においては、多様な前方車両への追従挙動が観測されるため、異なる条件下の追従挙動の違いを分析、把握することは重要である。前方車両への追従挙動を分析した既往研究は数多くみられるが、用いられてきた車両軌跡データは取得時間が短いため同一区間内における時間帯別の追従挙動の変化に着目した研究は行われていない。本研究では長時間にわたって時間帯別に取得された車両軌跡データが含まれた Zen-Traffic Data を用いて Newell モデルのパラメータ推定により、時間帯別の追従挙動の差異を調べた。その結果、同区間であっても時間帯ごとに異なる追従挙動が観測されることがわかった。

Key Words : car-following behavior, Newell's car-following model, traffic-jam, Zen-Traffic Data

1. はじめに

道路線形や通行する車種、ドライバーが多種多様な都市高速道路では、観測される前方車両への追従挙動も多様である。サグ部やトンネルの出入り口、非常に速度が遅い車両の存在など自車周辺の条件によっては前方車両への追従が緩慢になってしまい、緩慢な追従挙動が交通容量の低下、交通渋滞を引き起こすことも珍しくはない。交通流の円滑化にあたっては各種条件下での追従挙動の変化を分析したうえでドライバーの追従挙動を改善するためにより効果的な施策を考案する必要がある。そのために、前方車両への追従挙動を追従モデルとしてモデル式化し、モデル式のパラメータ推定によって各種条件下での自動車の追従挙動の違いを分析することは重要である。

高速道路上での自動車の追従挙動に着目した既往研究として、越ら¹⁾はサグやトンネルの出入り口などのボトルネックにおいて渋滞時に交通容量の低下が起こることを東名高速、中央自動車道の交通データより確認し、渋滞のストレスにより緩慢になってしまった前方車両への追従挙動が交通容量の低下を引き起こすと考察している。Taylorら²⁾はNGSIMの車両軌跡データを用いて動的時間伸縮法をNewell型車両追従モデルのパラメータ推定に適用することによ

り、同一運転者内での追従挙動の変化を確認した。

自動車の追従挙動に着目した既往研究は数多く見られるものの、用いられた車両軌跡データの取得時間の長さなどの理由から同区間内での時間帯別の追従挙動変化に着目した研究は行われていない。本来、時間帯ごとに通行するドライバーの属性、また道路状況や交通状態も変化することから異なる追従挙動が観測されるはずであり、その違いについて分析することは時間帯別に交通流の基本的特性を理解するうえで重要である。そこで本研究においては、近年利用可能になった阪神高速道路の特定路線の全車両の走行軌跡データが含まれたZen-Traffic Dataを用いて、Newellモデル式のパラメータ推定を行うことにより時間帯別の追従挙動の違いを調べる。

2. データと交通状態

阪神高速道路株式会社の公開する Zen-Traffic Data³⁾ (以下ZTDと呼ぶ)を車両軌跡データとして用いた。

(1) データ内容

ZTDには車両軌跡データとして個々の車両のID、速度、位置などの情報が0.1秒ピッチで記録されてい



図-1 データ取得区間(11号池田線 5.0-3.0kp)
(阪神高速道路；Zen-Traffic Data, <https://zen-traffic-data.net/>, 2020.2.27 アクセス)

る。これらの情報は照明柱上部に設置されたカメラが記録した映像より個々の車両を画像センシングによって識別することで取得されている。また、走行軌跡は画像センシングによって認識された全ての車両について記録されている。

(2) 区間

本研究にて用いたデータが記録された区間は阪神高速11号池田線のり方面、5.0-3.0kpの2000mの区間である。本区間は3.8kp付近に塚本入口から本線に入る車両との合流部を有し、合流部付近から上流方向への渋滞の伝播が頻繁に観測される。道路線形については、図-1に示す通り上流側(5.0-4.0kp)はS字曲線、合流部よりも下流側は直線となっている。

(3) 時間帯

ZTDは1時間分の車両軌跡データが5つ含まれたデータセットとなっている。各データが取得された時間帯は7:00-8:00、15:00-16:00、10:00-11:00の3つの時間帯であり、7:00-8:00、15:00-16:00では2時間分、10:00-11:00では1時間分のデータが利用可能となっている。なお、これらのデータが取得された日付は公開されていない。本研究においてはこれらの3つの異なる時間帯の車両軌跡データを用いて、時間帯別の車両追従挙動について分析していく。

表-1 データ取得時間帯

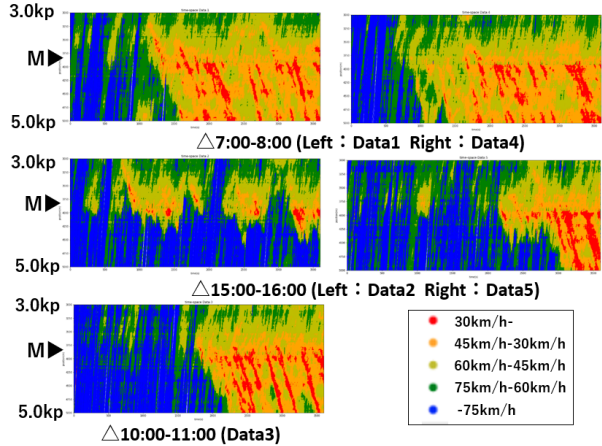
Data	時間帯
Data1	7:00-8:00
Data2	15:00-16:00
Data3	10:00-11:00
Data4	7:00-8:00
Data5	15:00-16:00

(4) 交通状態

交通状態として4.0kp前後5mに出現した車両ID数を集計することによって得られた4.0kpを1時間の間に通過した車両数(対象区間に流入する車両数)を表-2に、ZTDに記載された速度情報、位置情報、時刻情報より描画した速度別に色分けした車両軌跡図を図-2に示す。

図-2、表-2からわかる交通状態として7:00-8:00(Data1, Data4)では1時間あたりの通過台数が多く、また合流部から上流側にかけて長時間に渡って低速域の伝播が起きている。

M: Merging



(横軸：時刻 縦軸：位置 Mergingは合流部を表す)

図-2 速度別に色分けした車両軌跡図

表-2 4.0kpを通過した車両数 (veh/h)

	走行車線	追越車線
Data1	1204 veh	1745 veh
Data2	1181 veh	1669 veh
Data3	1153 veh	1545 veh
Data4	1286 veh	1814 veh
Data5	1196 veh	1589 veh

15:00-16:00(Data2, Data5)では、通過台数は7:00-8:00ほど多くはない。図-2より低速域も合流部付近だけにどまっていることが多く、低速域の伝播が観測されにくい時間帯であることがわかる。

10:00-11:00(Data3)では単位時間当たりの通過台数が少なく、また最初の30分ではどの区間でも渋滞が発生していない。しかしながら記録開始から30分を境に合流部から上流側にかけての低速域の伝播が起きていることがわかる。10:00-11:00は対象区間に流入する車両数が少なく、本来は低速域が発生しにくい時間帯であるものの、データ取得時には何らかの突発的な要因(極端に遅い車両の存在など)によってデータ記録中に合流部から上流側にかけて低速域が発生したと推察される。

3. Newellモデルとパラメータ推定

(1) Newellモデル

本研究ではNewell型車両追従モデルのパラメータを推定することによって時間帯別の追従挙動の分析を行った。NewellモデルはNewell⁴⁾によって提案された反応時間 τ と限界車間距離 d を用いたシンプルな車両追従モデルである。本研究では解釈の容易さとパラメータ推定に要する計算時間の速さを考慮し、追従挙動分析に使用するモデルとしてNewellモデルを採用した。

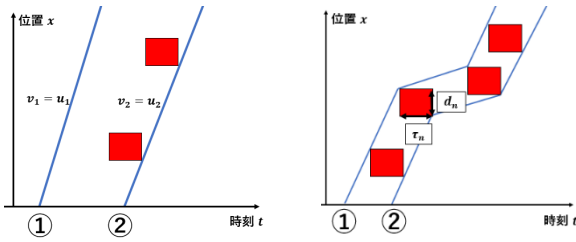


図-3 非追従状態(左)と追従状態(右)の車両軌跡

Newellモデルでは、図-3の左図のように前方車両との間に十分な余裕がある時、車両 n は希望走行速度 u_n で走行する。以上のように前方車両との車間距離が十分に広く、車間距離にかかわらず一定の希望走行速度 u_n で走行している状態を本研究では非追従状態と定義する。

一方、前方車両との車間が狭まってくると、車両 n は図-3の右図のように前方車両との間に反応時間 τ_n と限界車間距離 d_n で囲まれる時空間矩形領域が確保されるように速度を調整しながら走行する。以上のように前方車両との車間距離が狭く、車間距離に応じて速度を変えながら走行している状態を本研究では追従状態と定義する。

反応時間 τ_n は前方車両からの刺激が発されてから車両 n がそれに応じた適切な速度を出力するまでにかかる時間、限界車間距離 d_n は車両 n のドライバーが前方車両との間に確保する車間距離の下限値(停止時の車間距離)を意味する。参考として既往研究にて推定されたNewellモデルの反応時間 τ は1.4秒程度、限界車間距離 d は6-8m程度である。これら2つのパラメータ値は個々の車両ごとに固有の値をとるとされている。

Newellモデルで車両 n が時刻 t に出力する速度 $v_n(t)$ は(1)に示す線形式で表される。本研究では(1)の追従状態の線形式のパラメータ τ_n 、 d_n を個々の車両ごとに推定する。

$$v_n(t) = \begin{cases} u_n & (\text{非追従状態}) \\ \frac{s_n(t) - d_n}{\tau_n} & (\text{追従状態}) \end{cases} \quad (1)$$

(2) サンプルの抽出

パラメータ推定を行うにあたっては、推定に使用するにあたって適切なデータを抽出する必要がある。本研究では、以下のサンプル抽出を実施した。

1) 車両の抽出

当該区間にて車線変更した車両を推定から排除することにより、対象区間にて安定して追従状態にあった車両のみを取り出す。

2) 車両ごとのサンプルの抽出

線形補間によって得られたデータを排除することにより、車両軌跡が正確に記録出来ていないデータを推定から排除する。

3) 追従状態の抽出

非追従状態にあると考えられるデータのパラメー

タ推定への混入を防ぐために、速度に対して車間距離が大きいデータを排除する。 $(s_n(t) < 4(\text{sec}) \times v_n(t)(\text{m/sec}))$ の関係式を満たすデータのみ使用)

4) 車両軌跡データの不具合の特定

Edieの定義式の計算より交通状態を示す3つの指標 q, k, v が極端に大きな値を示した時空間領域を車両軌跡データに不具合があったと考えられる時空間領域とみなし、当該時空間領域を通過した車両をサンプルから外す。なお極端に大きな値を示した q, k, v を判定するにあたっての閾値は走行車線と追越車線の2車線について $q = 3.5\text{veh/s}$ 、 $k = 0.35\text{veh/m}$ 、 $v = 40\text{m/s}$ とする。

(3) パラメータ推定方法

パラメータ推定の方法は以下の通りである。

- 1) (2)を踏まえてZTDより0.1秒単位に離散化された時刻 t における車両 n の速度 $v_n(t)$ 、並びに車間距離 $s_n(t)$ を生成する。
- 2) 式(1)のパラメータ τ_n 、 d_n を回帰分析により個々の車両ごとに算出する。回帰分析にあたっては最小二乗法を用いて以下に示す式(2)を最小化する τ_n 、 d_n を求める。なお、式(2)中の T_n は車両 n に関するデータが得られた時刻 t の集合を意味する。

$$\min \sum_{t \in T_n} \left(\frac{s_n(t) - d_n}{\tau_n} - v_n(t) \right)^2 \quad (2)$$

- 3) 平均値の算出、ヒストグラムの描画にあたっては算出されたパラメータ τ_n 、 d_n いずれかの値が負の値となる車両をパラメータ推定結果から除外する。(物理的矛盾の回避)

4. 推定結果と考察

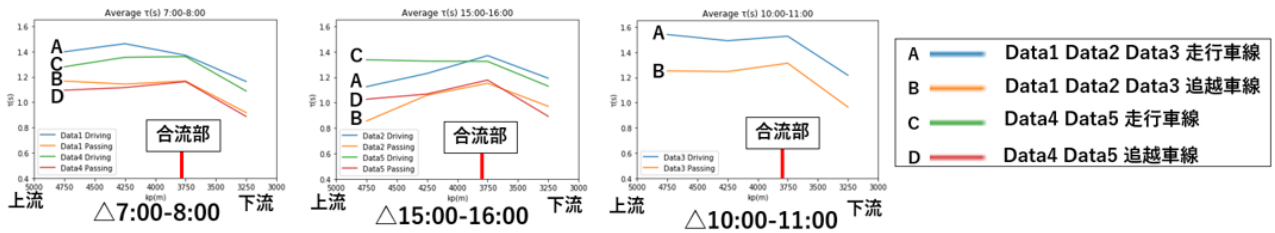
(1) 4分割した500mごとの区間での推定

対象区間5.0-3.0kpを4等分割した500mごとの区間内でパラメータを推定した結果を示す。区間ごと、車両ごとに推定したパラメータの平均値を折れ線グラフ形式で図-4、図-7に、推定された個々の車両のパラメータの分布をヒストグラム形式で図-5、図-6、図-8、図-9に示す。(赤色の破線は平均値を示す)なお、折れ線グラフの縦軸と横軸、ヒストグラムの横軸のスケールは τ と d でそれぞれ一致している。

推定に使用されたデータのスケールとして、車両台数(3.(2)、(3)で残った車両台数)は、走行車線で500台ほど、追越車線で700台ほどと全車両の30-40%ほどである。また、500mごとの区間での推定に使用された速度と車間距離データの組み合わせ $(v_n(t), s_n(t))$ の数は1台当たり300-400個ほどである。

a) 反応時間 τ について

図-4の折れ線グラフより、反応時間 τ の平均値は0.8-1.6秒程度となっている。既往研究にて推定され



(縦軸: τ (sec) 横軸: 位置 (m))
 図-4 区間ごとの反応時間 τ の平均値

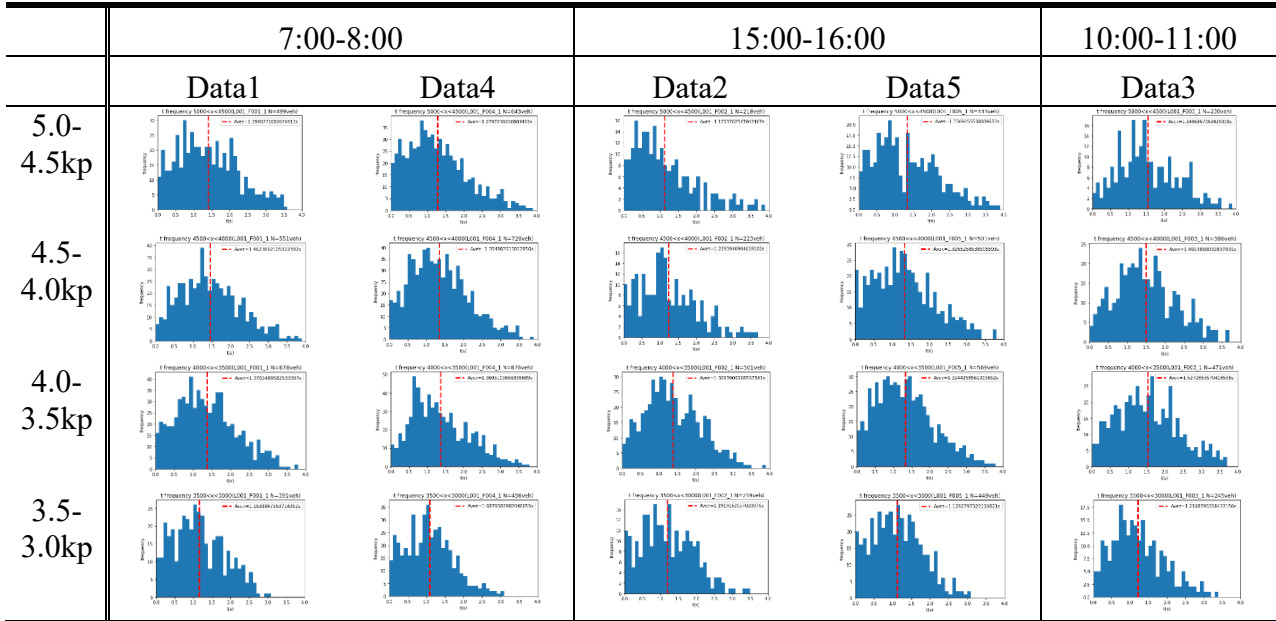


図-5 反応時間 τ の分布(走行車線)

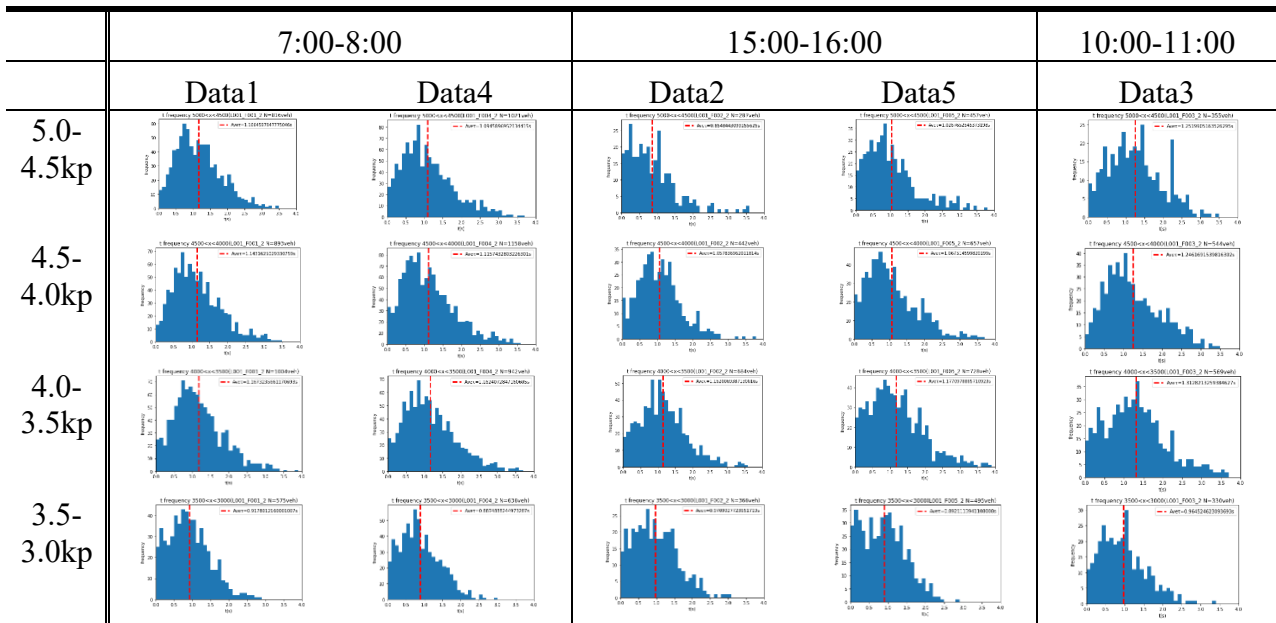
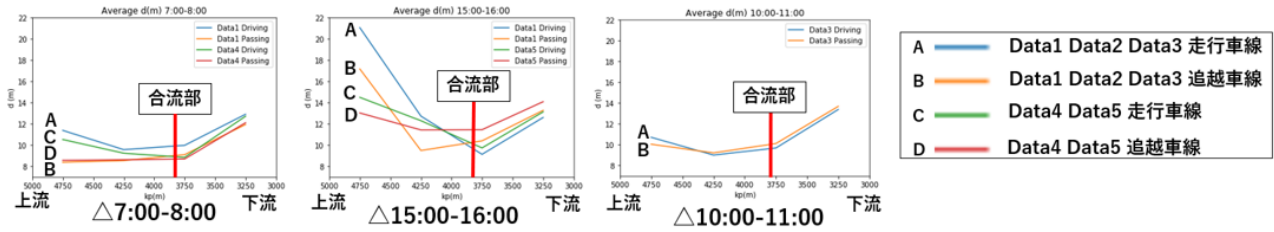


図-6 反応時間 τ の分布(追越車線)



(縦軸: d (m) 横軸: 位置 (m))
 図-7 区間ごとの限界車間距離 d の平均値

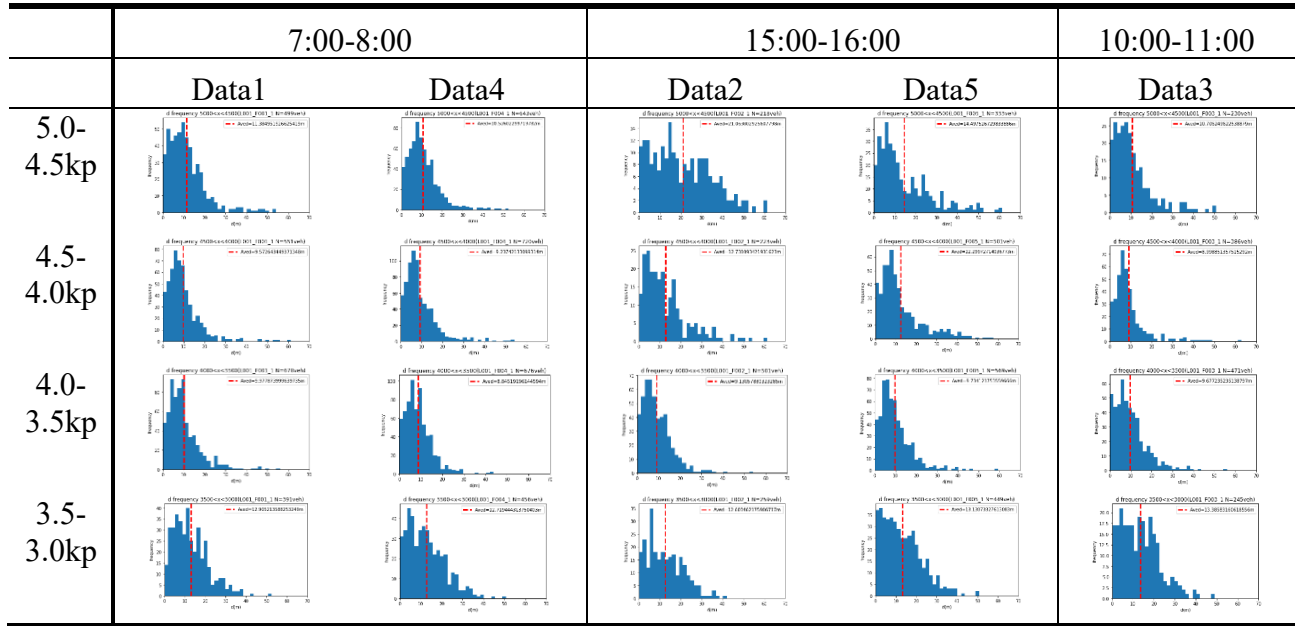


図-8 限界車間距離 d の分布(走行車線)

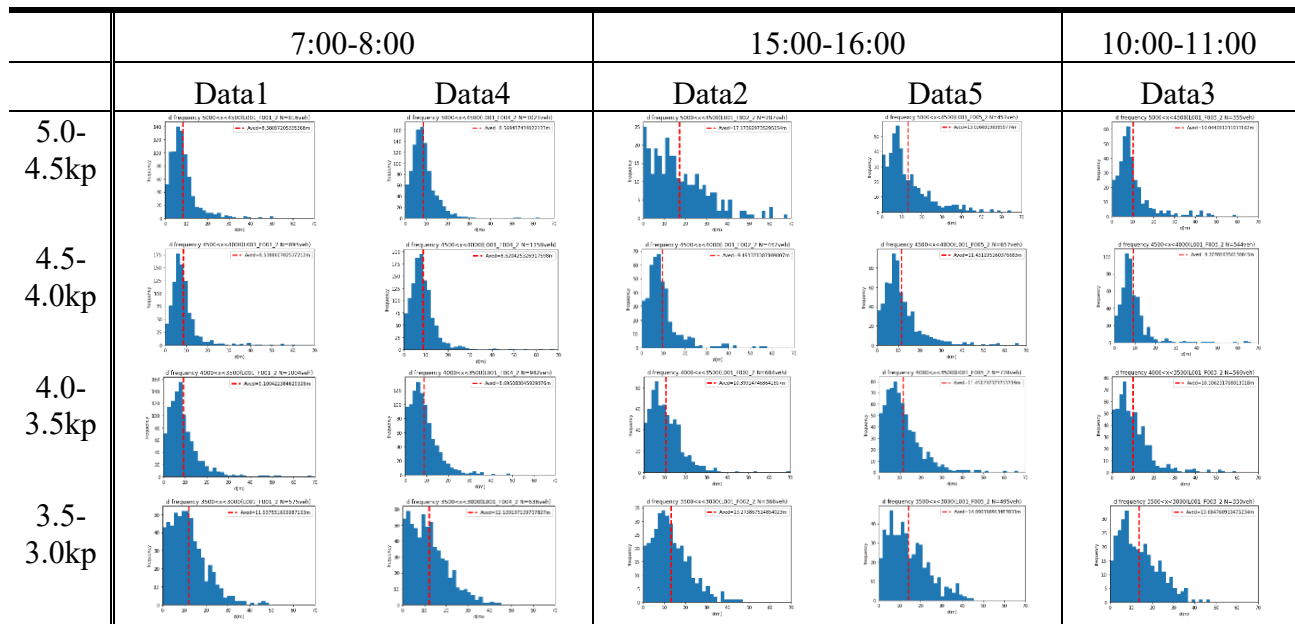


図-9 限界車間距離 d の分布(追越車線)

た τ の平均値は1.4秒程度であるため、本研究での推定値は既往研究に近い値となっていることが確かめられる。

まず、時間帯、区間に関わらず観測される特徴としては図-4の折れ線グラフより追越車線側の反応時間 τ の平均値は走行車線側の τ の平均値よりも0.2-0.4秒ほど小さくなっていることがわかる。図-5、図-6のヒストグラムを見ても、走行車線側では個々の車両ごとの τ の分散が大きくなり τ は大きな方まで広く分布している一方、追越車線側での τ の分散はやや小さく τ の分布は小さな方に偏っている。これより、時間帯、区間に関わらず、追従挙動の俊敏さには走行車線と追越車線を走行するドライバー間で差異が見られ、追越車線のドライバーの方がより俊敏な追従を行っていることが確かめられる。

時間帯に関わらず観測される特徴としては、図-4の折れ線グラフより合流部付近(4.0-3.5kp)にて反応時間 τ の平均値が大きくなっているということが挙げられる。ヒストグラムを見ても、合流部付近において τ がやや大きな方に分布していることがわかる。一方、下流側(3.5-3.0kp)ではどの時間帯でも τ の平均値は小さくなっている。

合流部では、本線に流入してくる車両が自車と前方車両の間に割り込んでくることにより、ドライバーは運転を阻害されてしまいやすい。このため、合流部付近では追従が緩慢になり、反応時間 τ が増大したと考えられる。

一方、下流側は曲線や勾配、合流が存在しない直線区間となっており、追従を阻害される要因が少ない区間であると言える。これより、他の区間と比較すると、俊敏な追従挙動を保つことができ、反応時間 τ が小さくなる傾向が表れたと考えられる。

時間帯別の特徴としては合流部から上流側にかけて渋滞が伝播しやすい7:00-8:00の時間帯では、合流部だけにとどまらず上流側(5.0-4.0kp)での反応時間 τ の平均値が大きくなっていることが、折れ線グラフより読み取れる。ヒストグラムを見ても、 τ は合流部と同様小さな方にはあまり分布していない。一方、合流部から上流側にかけて渋滞が伝播しにくい15:00-16:00では、上流側での τ の平均値がそこまで大きくない。ヒストグラムを見ても、 τ の分布はやや小さな方に偏っており、上流側での追従挙動の俊敏な車両の割合が高いことがわかる。

以上より、渋滞や渋滞の伝播が観測されやすい時間帯とそうでない時間帯で追従挙動の俊敏さには違いが見られ、渋滞の発生、伝播が起こりやすい時間帯や区間では追従挙動が緩慢になりやすい傾向が確かめられた。その原因としては、渋滞が発生、伝播しやすい時間帯ではドライバーが渋滞によるストレスを感じやすく、ストレスによって真面目に前方車両に追従しようとする意欲を失うためではないかと考えられる。

対象区間に流入してくる台数が少ないにも関わらず観測途中から渋滞が観測された10:00-11:00では、両車線とも他の時間帯と比較して明らかに τ の平均

値が大きくなっていることがわかる。ヒストグラムを見ても他の時間帯と比較して分布の山がグラフの右側に位置しており、 τ の大きな車両の割合が高い。10:00-11:00では緩慢な追従挙動が観測されたものの、7:00-8:00と比較して渋滞していた時間が短いことより、交通状態だけで追従挙動の緩慢さを説明するのは難しい。本時間帯については後の低速域におけるパラメータ推定でもより詳しく調べる。

b) 限界車間距離 d について

図-7の折れ線グラフより、限界車間距離 d の平均値は8-14m、大きなところで20m程度と既往研究で推定された値(6-8m)と比較するとやや大きくなっている。既往研究で推定された値よりも大きくなった原因としては、本節では低速域だけではなく全ての交通状態についてパラメータを推定したことが関係していると考えられる。(低速域のみ推定対象とした次節での d の平均値は6-10mと既往研究での推定値に近い値となっている。)

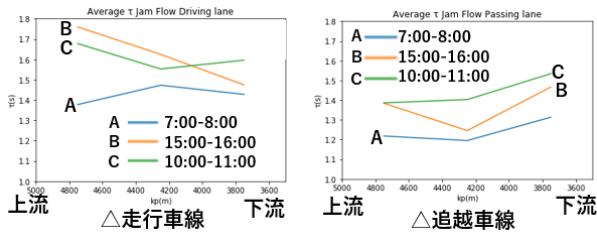
時間帯に関わらず確かめられる全体的な傾向としては、図-7の折れ線グラフより合流部付近(3.5-3.0kp)にて限界車間距離 d の平均値が小さくなっていることが確かめられる。ヒストグラムを見ても、時間帯に関わらず合流部付近では d の分布が小さな方に偏っている。これより、全体的な傾向として合流部付近にて限界車間距離 d が小さくなる傾向が確かめられたと言える。

その原因としては、合流部付近にてランプからの合流車両が自車と前方車両との間に割り込んだ結果、ドライバーが車間を狭めざるを得なくなることが関係していると考えられる。

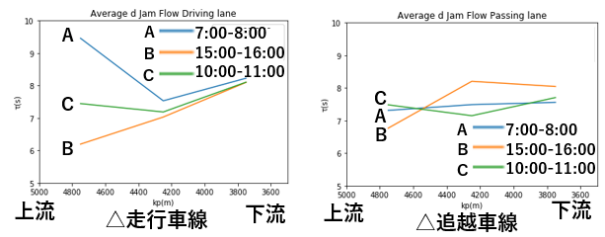
なお、時間帯や区間に関わらず観測される特徴として反応時間 τ では走行車線と追越車線で明らかな差異が見られたものの、限界車間距離 d については車線間で明確な違いは見られなかった。

時間帯別の特徴としては、図-7の折れ線グラフより渋滞が上流側へと伝播しやすい7:00-8:00、記録途中で渋滞が伝播し始めた10:00-11:00において、上流側(5.0-4.0kp)での限界車間距離 d の平均値が小さくなっていることが確認できる。ヒストグラムを見ても、上流側では分布の山が急峻であり d は小さな方に激しく集中していることがわかる。一方、渋滞が発生、伝播しにくい15:00-16:00では、 d の平均値は大きくなっていることが確かめられる。ヒストグラムを見ても、上流側での分布の山の形状は比較的なだらかで d は小さな方だけではなく大きな方にも広く分布している。

これより、渋滞が発生、伝播しにくい時間帯や区間にて限界車間距離 d が小さくなる傾向が確かめられた。このような傾向が生じた原因としては、渋滞が発生しにくい時間帯や区間では各車両が希望走行速度で走行できており、ドライバーが車間を広く確保しようとする余裕を持つことができると考えられる。



(縦軸: τ (sec) 横軸: 位置 (m))
 図-10 低速域における区間ごとの反応時間 τ の平均値



(縦軸: d (m) 横軸: 位置 (m))
 図-11 低速域における区間ごとの限界車間距離 d の平均値

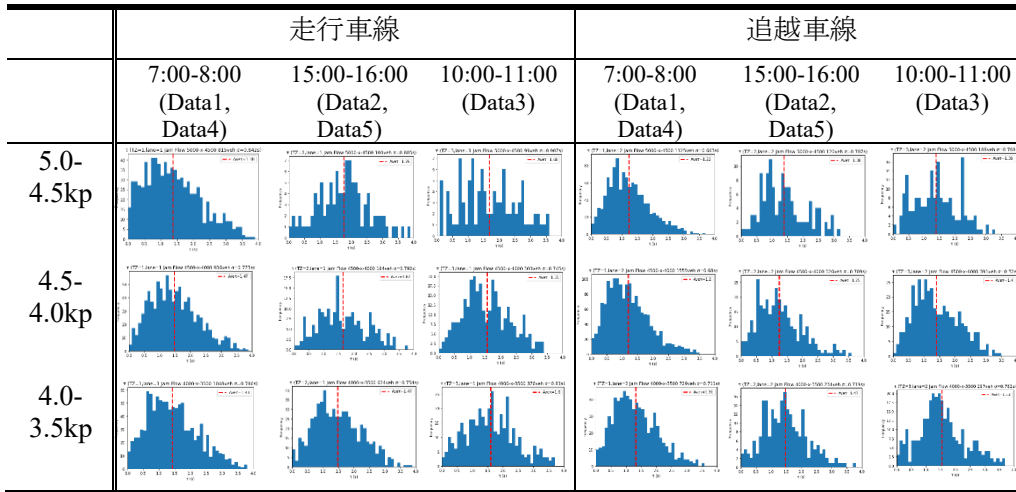


図-12 低速域における区間ごとの反応時間 τ の分布

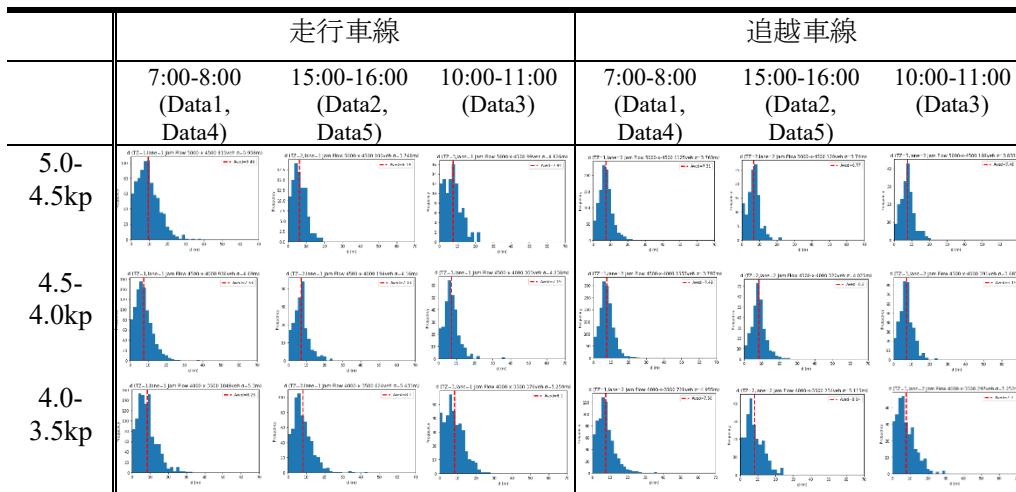


図-13 低速域における区間ごとの限界車間距離 d の分布

(2) 低速域での推定

交通状態別のパラメータ推定結果のうち低速域での推定結果を示す。なお交通状態はEdieの定義式から算出した平均速度によって区分する。(低速域: $v < 40\text{km/h}$)

また推定にあたっては、低速域にあったとされる車両のうち、50-60%の車両を使用した。

a) 反応時間 τ について

区間ごとに推定した低速域の反応時間 τ の平均値

を図-10の折れ線グラフに、分布を図-12のヒストグラムに示す。下流側(3.5-3.0kp)では低速域が観測されなかったため、下流側は対象外とする。

図-10の折れ線グラフより、渋滞の発生しやすい7:00-8:00における低速域の反応時間 τ は、渋滞の発生しにくい他の時間帯と比較して両車線とも全区間にわたって小さくなっていることが確認できる。図-12のヒストグラムを見ても、7:00-8:00では他の時間帯と比較して τ の分布はやや小さな方に偏っている。これ

より、渋滞が発生、伝播しやすい時間帯はそうでない時間帯と比較すると低速域にて追従が緩慢になりにくい傾向が確かめられたと言える。

このような傾向が生じる原因としては、渋滞が発生しやすい時間帯に対象区間を通行するドライバーほど渋滞に巻き込まれることに慣れており、渋滞に巻き込まれてもストレスを感じにくいために、低速域での追従挙動が緩慢になりにくいということが考えられる。

区間別の推定にて明らかに τ が大きくなった10:00-11:00は本来渋滞が発生しにくい時間帯のため、低速域での τ が15:00-16:00と同様大きくなっているものの飛びぬけて大きいということはない。しかしながら、この時間帯は渋滞の観測された時間が30分程度と15:00-16:00と比較すると長いことにより、追従挙動が緩慢になった車両の割合が高くなる。したがって、(1)で10:00-11:00の反応時間 τ が大きくなった原因としては、本来渋滞が発生しにくい時間帯のためドライバーが渋滞に慣れていないにも関わらず、観測時には渋滞が発生したことにより追従挙動が緩慢な車両の割合が高まったということが考えられる。

b) 限界車間距離 d について

図-11より、走行車線側の上流側にて渋滞の伝播しやすい7:00-8:00の低速域における限界車間距離 d の平均値が他の時間と比較して大きくなっていることが確認できる。図-13のヒストグラムを見ても、7:00-8:00の上流側では分布の山がなだらかな形状となっており、限界車間距離 d はやや大きな方に分布していることがわかる。一方、追越車線側では渋滞の発生、伝播が観測されやすい7:00-8:00と他の時間帯で低速域における d に大きな差は見られなかった。これより、限界車間距離 d については反応時間 τ ほど渋滞が観測されやすい時間帯とそうでない時間帯で顕著な違いが見られなかったと言える。

このような傾向が確認できた原因としては、走行車線側では先を急がないドライバーの割合が高く、車間に余裕を持たせる一方、追越車線側では時間帯に関わらず先を急ごうとするドライバーの割合が高いため、渋滞によるストレスを感じなかったとしてもできるだけ前に進もうと車間を詰めてしまうことが考えられる。

5. 結論と課題

本研究では、時間帯別の全車両軌跡データ含まれ

たZTDを用いてNewellモデルのパラメータ推定を個々の車両ごとに行うことにより、時間帯別の追従挙動の違いについて調べた。その結果次のことがわかった。

- ① 同一区間であっても時間帯別の追従挙動には異なる傾向が見られる。時間帯別の追従挙動の違いと強い関係を有しているものとしては、時間帯別の交通状態が考えられる。
- ② 渋滞が観測されにくい時間帯では低速域での追従挙動が渋滞の観測されやすい時間帯の低速域と比較すると緩慢に、また走行車線側での限界車間距離が狭まる傾向がある。

これより、本来渋滞が発生しにくい時間帯に設備の工事や道路周辺で開催される大規模なイベントにより渋滞が予想される場合は、渋滞が発生しやすい時間帯以上に交通容量の低下や追突事故に注意を払う必要があると考えられる。

今後の課題としては、まず現段階では議論が不十分なパラメータの推定精度に着目し、推定精度向上にあたって、サンプル抽出の際に設定した閾値、並びにサンプル抽出手法そのものを見直し改良していく必要がある。また、新しく公開された150時間分のZTDもパラメータ推定に使用することにより、本研究にて着目されなかった時間帯の傾向を調べていく必要がある。

謝辞：本研究にあたっては阪神高速道路株式会社よりZen-Traffic Dataを提供していただきました。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 越正毅；高速道路のボトルネック容量，土木学会論文集，第371号/IV-5，1986.7
- 2) Jeffrey Taylor, Xuesong Zhou, Nagui M. Roupail, Richard J. Porter ; Method for investigating intradriver heterogeneity using vehicle trajectory data : A Dynamic Time Warping approach, Transportation Research Part B 73 (2015) 59-80, 2015.1
- 3) 阪神高速道路株式会社 ; Zen-Traffic Data, <https://zen-traffic-data.net/>, 2020.2.27 アクセス
- 4) G. F. Newell ; A simplified car-following theory: a lower order model, Transportation Research Part B 36, 195-205, 2002

ANALYSIS OF CAR-FOLLOWING BEHAVIOR IN DIFFERENT TIME ZONES BY ESTIMATING THE PARAMETERS OF NEWELL'S MODEL

Kotaro YOSHIDA, Wataru NAKANISHI and Yasuo ASAKURA