

# プローブデータによる 交差点周辺の走行特性

松本 拓樹<sup>1</sup>・塚井 誠人<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 広島大学 第4類社会基盤環境工学プログラム (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

E-mail: b161466@hiroshima-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 広島大学 准教授 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

E-mail: mtukai@hiroshima-u.ac.jp

一般道における渋滞は、交差点付近で発生することが多い。特に交通量の大きい交差点では、交差点に接続するリンクの渋滞によって車両が交差点を通過できなくなる、先詰まりが発生することがある。先詰まりが発生すると、渋滞は面的に拡大する。本研究では、民間プローブデータに基づき、先詰まりの捕捉可能性を検討する。単一交差点を対象として、各プローブカーの挙動に着目し、先詰まりを直接観測することを試みた。交差点への流入速度と流出速度の関係から、先詰まりの影響を受けたとみられる車両がみられた。さらに、全車両の走行挙動をクラスタリングし、得られた9クラスターを、混雑時/非混雑時に、混雑時をさらに先詰まりあり/なしに分類した。

**Key Words:** probe data, standstill, driving trajectory

## 1. はじめに

一般道路における渋滞は、交差点付近で発生することが多い。交差点の渋滞は主に信号待ちによって発生するが、交通量が多い場合、右折時の対向車待ちや左折時の歩行者・自転車待ちによって待ち行列が発生することもある。さらに交通量が交通容量に近づくと、交差点の下流側のリンクで発生した渋滞が伸びることで、後続車が交差点を通過できなくなる先詰まりが発生する。先詰まりが上流側の交差点へと拡大すると、渋滞は面的に広がっていく。面的な渋滞の発生はグリッドロックと呼ばれる。

先詰まりやグリッドロックについて、これまでに様々な研究が行われている。ただしグリッドロックの定義は研究によって異なる点に留意する必要がある。橋本ら<sup>1)</sup>は、民間プローブデータを用いて、ボトルネック交差点で発生した渋滞の影響範囲を明らかにした。この研究では、まず道路リンクごとに、日別時間帯別に平均速度を算出し、渋滞/非渋滞を判定する。その上で、同一時刻の下流側区間との渋滞/非渋滞の関係性からボトルネック指数を求め、先詰まりの影響範囲を特定する手法を提案している。清田ら<sup>2)</sup>は、タクシープローブを用いて東日本大震災時に都内で発生したグリッドロックを分析し、ボトルネック地点を明らかにした。道路リンクごとに各時間の平均速度を算出し、著しい速度低下が2時間以上

にわたるリンクをグリッドロック発生と判定する。さらにグリッドロック発生リンクが連続する区間のうち、最下流地点をグリッドロックの起点として抽出した。これらの研究では、道路リンクごとに渋滞やグリッドロックの発生を判定し、その区間が連続する場合をその発生地点として抽出アルゴリズムを提案している。

大島ら<sup>3,4)</sup>は、4つのリンクからなる単一の正方形の道路ネットワークにおいて、渋滞が環状に連なる現象をグリッドロックと定義している。交差点容量と右折率などを用いて、グリッドロックによって速度が0へと漸近する条件を明らかにし、その発生条件から抑制対策を論じている。岩岡<sup>5)</sup>は、大島らの提案した条件式に信号制御パラメータを導入して、AVENUEによるシミュレーションを行った。オフセット時間と発進波の到達時間の組み合わせから、グリッドロックを抑制できるとした。ただしこれらの研究は、より大規模なネットワークへの応用に課題が残る、としている。田中ら<sup>6)</sup>は、交通シミュレーション時のグリッドロック発生を、単一交差点と複数交差点に分類した。前者は単一交差点に進入する全方向で渋滞となる現象で、一般的なグリッドロックと異なる。これらによりシミュレーションの正確性が損なわれないように、道路ネットワークの修正や、経路選択方法について論じている。

上述した研究<sup>1) 2)</sup>において先詰まり現象は、隣接リンクの平均速度の低下が共起する状態として検出されてい

表-1 データの概要

項目	形式
カーナビID	16進数
走行距離の積算値	10進数 (単位はm)
自車経度	10進数
自車緯度	10進数
年月日時分秒	10進数 (YYYY-MM-DD hh:mm:ss)
自車速度	10進数 (単位はkm/h)
自車方位	10進数 (単位は度)
道路種別	10進数
3次メッシュコード	8桁の10進数

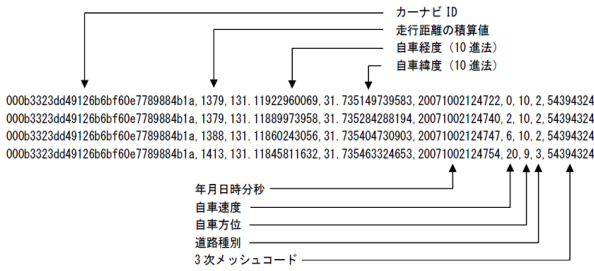


図-1 データの形式

るにすぎない。そのため、実際には先詰まりが発生していない可能性もある。さらに、この判定方法では事後的な渋滞の分析は可能だが、渋滞やグリッドロックの発生を抑制する対策の立案は困難である。これらの難点を解消するためには、リンクベースではなく、プローブカーの走行軌跡上の速度推移に着目した分析が有効と考えられる。

本研究では、プローブデータの分析を通して先詰まり現象の捕捉可能性について検討する。具体的には、単一の交差点を対象にプローブデータに基づく先詰まりの発生について検討を行った。ただし、プローブデータは全走行車については得られないため、実際の交通状況のサンプリングとなっていることに留意しなくてはならない。対象交差点は、橋本らの研究と同一の、広島県内の大正交差点とした。

## 2. 対象とするデータと交差点

### (1) プローブデータの概要

本研究では、カーナビから収集された、民間プローブデータを用いる。その概要を表-1 に示す。カーナビ ID は、個人情報保護のため 1 日ごとに切り替えられる。自車速度は、カーナビの搭載車両が衛星から受信する電波のドップラー効果に基づいて算出された瞬間速度である。表-1 に示したデータは 3 秒ごとに収集され、図-1 に示す形式で格納される。データの取得期間は、2015 年 4 月から 12 月までの 9 か月間である。



図-2 交差点の概要とリンク番号

### (2) 交差点の概要

大正交差点の概要を図-2 に示す。本交差点は、国道 2 号、国道 31 号、および広島県道 164 号が接続する交差点である。県道 164 号と国道 2 号 (至広島市内) はどちらも広島市内方面に向かう道路である。また、国道 31 号は、呉方面に向かう道路である。

国道 2 号 (至大阪)、国道 2 号 (至広島市内)、国道 31 号は、リンク両端に信号がある。一方で、県道 164 号の広島市内側には信号がない。さらに市内側へ 80m 程の交差点に信号があり (停止線までは 60m 程)、この信号の影響を受ける可能性がある。以下の分析では、各道路をそれぞれ図-2 に示すリンク番号で表記する。

### (3) データの処理手順

#### a) データの抽出

広島県内の大正交差点付近のデータを抽出するため、この交差点に接続する 4 リンク上に位置するデータを抽出する。また、データの位置するリンク番号を、データに付与する。

#### b) 経路の特定

手順 a) で各データに付与した位置リンクの情報から、交差点を通過した経路を求める。同一 ID の車両について、通過時刻が早い側を流入リンク、通過時刻が遅い側を流出リンクとして、ID ごとに経路を求める。得られた各経路のデータ数と台数を、表-2 に示す。1→2, 1→3, 2→4, 3→1, 4→2 は比較的データ数が多い。1→3, 2→4, 3→1, 4→2 は直進であり、1→2 は右折の経路である。本研究では、データ数が多い組み合わせのうち、右折となっている 1→2, 1→2 と流入リンクが同じ 1→3, および 1→2 の対向車線の直進である 3→1 の 3 つの経路について分析を行う。

#### c) 交差点からの位置を付与

各データに、交差点からの距離を交差点 KP として付与する。GIS 上で、DRM リンクに交差点を 0m とした 1m ピッチで点を発生させ、データ位置と最も近い点の値を交差点 KP とする。以下では簡単のため、交差点 KP は KP と表記する。

表-2 経路の特定結果

経路	データ数	台数	経路	データ数	台数	経路	データ数	台数	経路	データ数	台数
1→2	28051	1282	2→1	8818	568	3→1	44949	4956	4→1	2878	284
1→3	47109	4427	2→3	645	37	3→2	2110	151	4→2	25494	2667
1→4	2863	337	2→4	31361	2502	3→4	5462	500	4→3	1345	134

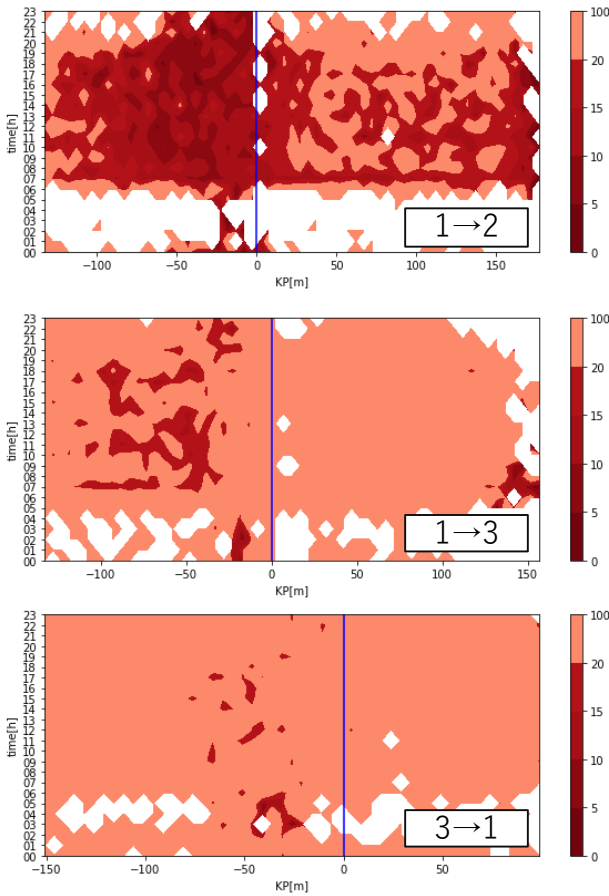


図-3 平均速度コンター図

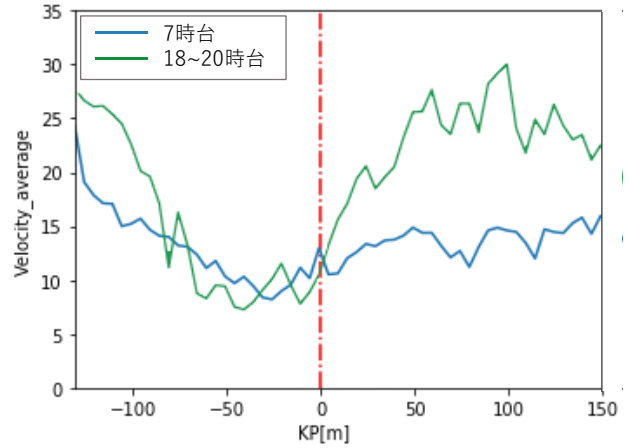


図-4 平均速度グラフ

### 3. 交通状況に関する分析

#### (1) 各経路の交通状況の概観

各経路の交通状況を概観するため、時間帯別に、各 KP における平均速度を求めて、横軸を KP、縦軸を時間帯とした平均速度コンター図を作成した。その結果を図-3 に示す。同図では、交差点へ流入するリンクの KP を負、流出するリンクの KP を正、交差点の中心を 0 としている。3→1 の図は、リンク 1 の 100m 以降の地点に高架橋があり、その直下でのデータの取得数が少ないため除外した。時間帯によってデータがない KP は白色で示す。

図-3 より、1→2 では、日中に流入リンクで慢性的な速度低下が発生していることが読み取れる。さらに、流出リンクでは、広い範囲で速度低下が起こっている。特に 7 時台では、ほぼすべての KP で速度が低下しており、流出リンクの速度低下が流入リンクに影響する先詰まり

の発生が推測できる。一方、18 時台以降は特に流出リンクにおいて速度低下はあまり見られず、先詰まりの発生は少ないと考えられる。1→3 では一部で速度低下が発生しているが、流出リンクを中心にほとんどの KP では速度低下が発生していない。3→1 では、流入・流出リンクどちらでも速度低下はほとんど見られない。すなわち、速度低下は 1→2 で多く発生しており、特に 7 時台では区間全体で速度が低下している。一方、1→3、3→1 では一部を除いて速度低下は発生していない。

図-3 の 1→2 において、区間全体で速度低下が発生している 7 時台と、流出リンクでの速度低下があまり見られなくなる 18~20 時台を比較することによって、先詰まりによる地点別平均速度への影響を考察する。この時間帯に交差点を通過した車両は、7 時台が 300 台、18~20 時台では 140 台（1 時間当たり平均 47 台）である。各時間帯について、地点別の平均速度の推移を折れ線グラフとして作成する。

その結果を図-4 に示す。データ分析の関係上、各車両の観測データのうち最下流点で観測された 1 データを削除した。そのため 150m 以降ではデータ数が少なくなり精度が下がるため、削除して分析対象外とした。

流入リンクの平均速度を比較すると、-30m 付近では同程度の平均速度だが、-50m 付近では 18 時から 20 時台の平均速度の方が低い結果となった。一方で、-70m より手前では 18~20 時台の平均速度の方が高い。7 時台には通勤などで市内に向かう車両が多く、18~20 時台には市内からの車両が多い。7 時台には青時間が長いので、速度が低いものの進む時間は長く、18~20 時台では車両

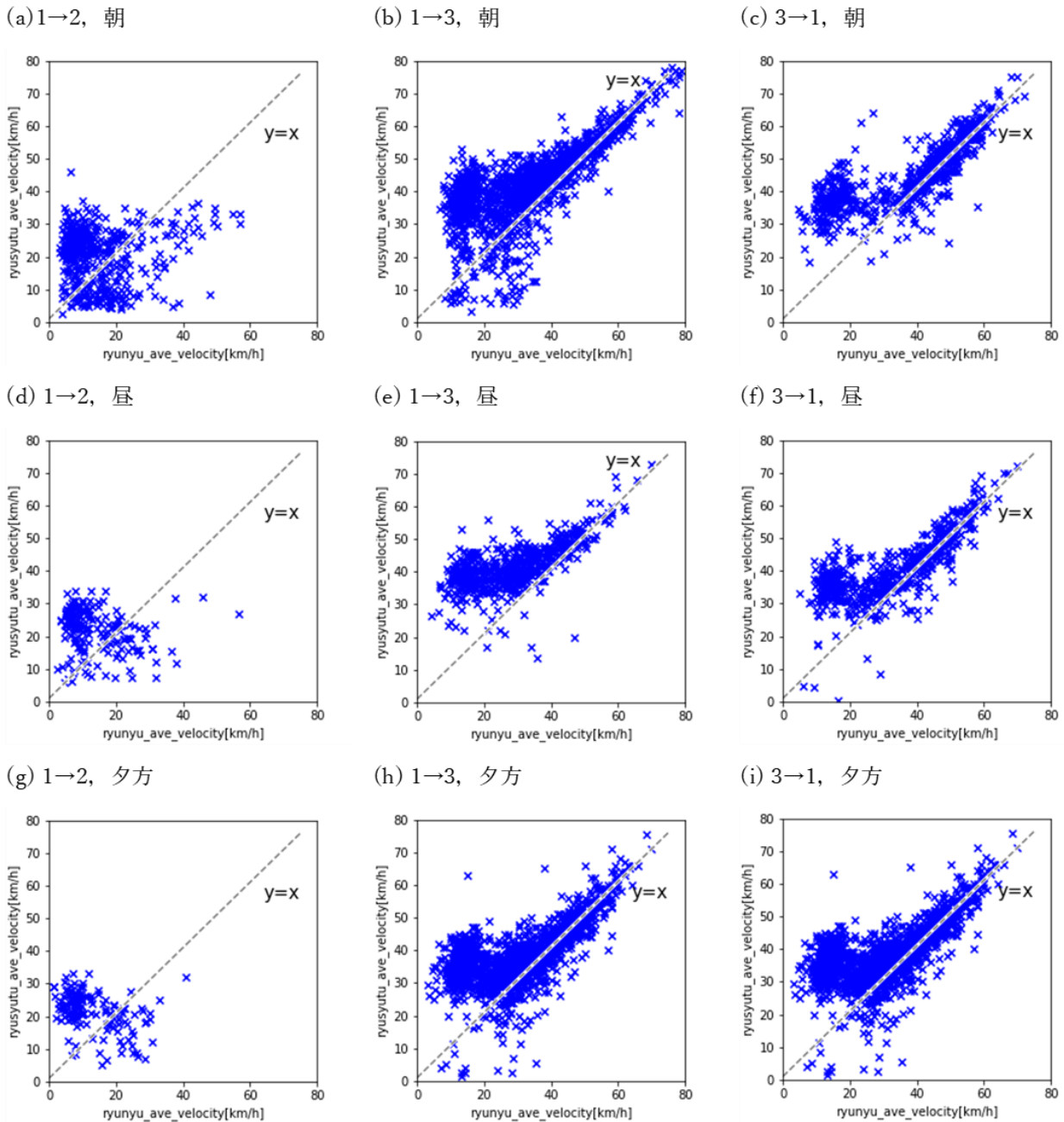


図5 流入ー流出平均速度の散布図

が少なく車列は伸びないものの、停車している時間は長くなったためと考えられる。

流出リンクに着目すると、18~20 時台には、170m 付近にある交差点の手前では速度が低下しているが、100m 付近では速度が回復する。下流側信号を起点とする車列が、100m 付近まで伸びているためと考えられる。また、50m から 100m の平均速度は 25m/h 程度でありやや大きい。一方で 7 時台には、150m から 0m の大正交差点まで、平均速度が 15km/h 程度となっている。交差点を離れても速度の回復は見られない。下流側にある信号の車列が大正交差点まで伸びていると考えられ、先詰まりが発生している可能性が高い。

(2) 各車両の交差点付近における速度の比較

(1)より、先詰まりの発生が推測される場合、流入リンクと流出リンクの速度差は小さくなると考えられる。しかし、平均速度の比較では、各車両を直接観測していないため、先詰まり現象を直接捉えているとは言えない。そこで、各車両の流入リンクと流出リンクの速度の比較を行い、先詰まりを直接捕捉することを試みる。

流入リンクと流出リンクの速度の比較には、散布図を用いる。交差点から 60m の範囲内の流入リンクと流出リンクそれぞれの平均速度を求め、流入ー流出平均速度の散布図を作成する。信号・右折待ちも先詰まりも発生しない場合は、流入・流出リンクどちらの速度も大きく同

程度に、信号・右折待ちが発生するが先詰まりは発生しない場合は、流入リンクの速度のみ小さくなる。また、先詰まりが発生する場合は、流入・流出リンクの速度は小さく同程度となるか、流出リンクの速度がより小さくなると考えられる。

流入一流出平均速度の散布図は、時間帯を朝（6 時台から 8 時台）、昼（11 時台から 13 時台）、夕方（17 時台から 19 時台）に分けて作成する。その結果、**図-5**に示すようになった。

1→2の経路（**図-5a,d,g**）では、そのほかの経路と比べて、全体的に散らばりが大きくなっている。流入速度に比べて流出速度が大きいデータ（第一象限左上）は、流入速度が 5~10km/h、流出速度が 20~30km/h 付近の領域に集中している。これらの車両は、信号待ちによって速度が低下したのち、先詰まりの影響を受けることなく流出したと思われる。流入速度より流出速度が小さい車両（第一象限右下）は、先詰まりにより、右折後に速度低下したと考えられる。流入・流出速度が同程度かつ、速度が大きいデータは見られない。つまり、信号や先詰まりの影響を受けなかった場合でも、右折時には速度を低下させている。これらの車両は、先詰まりによって流入・流出速度が低い車両との分布の差が小さく、判別は難しい。しかし、夕方には流入・流出速度とも 20km/h 以下の車両はほとんど見られない。以上より、流入・流出速度ともに 20km/h 以下の車両は、先詰まりの影響を受けている可能性がある。**図-3**では7時台のみ、ほとんどの KP で速度低下が発生していた。しかし、**図-5(d),(g)**が示すように、先詰まりは昼や夕方の時間帯にも発生していると推測できる。

1→3（**図-5 b,e,h**）も 1→2 と同様で、朝に台数が多い。直進のため流入・流出速度がどちらも高い車両が多く、視覚的にも先詰まりとそうでない車両の判別はつきやすい。朝と夕方では、流入・流出速度が 20km/h 以下や流出速度の方が低い、先詰まりとみられる車両も一部ある。

3→1（**図-5 c,f,i**）では、夕方の車両が最も多い。しかし、1→2、1→3 と比べ、先詰まりとみられる車両はほとんど見られない。この経路は直進であり、流入・流出速度のどちらも高い車両が多い。特に朝は、信号で停車した車両と、信号待ちをせずに通過した車両の違いが明確に判別できる。

### (3) 各車両の走行挙動によるクラスタリング

各車両の走行軌跡上の速度推移を、以下走行挙動と呼び、その特徴を明らかにするクラスタリングを行う。まず各車両の地点間の走行挙動を補間して、KP 別の速度を求める。その上で、地点別速度系列をクラスタリングして、走行挙動を分類する。クラスタリングには k-Shape 法を用いた。k-Shape 法とは、Papanizos ら<sup>7)</sup>によ

て提案された、時系列グラフの形状に基づくクラスタリング手法である。クラスタ数は、SSE（クラスタ内誤差平方和）の変化とクラスタリング結果を勘案して、9 とした。その結果、**図-6**に示すクラスタを得た。黒線はそれぞれ車両の走行挙動であり、赤線が交差点の位置、灰色の範囲は交差点から 15m の範囲で、これはおよそ 30m 四方の大正交差点を示している。

車両速度が 0 の場合、交差点の信号待ちによる停車と考えられる。交差点（0m）の左側の停車は、大正交差点の信号待ちであり、交差点の右側の停車は、さらに下流側の交差点の信号待ちである。ただし、交差点内で停車した場合は、対向車線の車両の通過待ちか、歩行者や自転車の通過待ちによる停車と考えられる。

これらの走行挙動に基づいて、各クラスタを考察する。クラスタ 1 およびクラスタ 9 は、信号待ちのため交差点前で一度停車し、交差点通過後は停車することなくリンクを通過した車両が多い。また、クラスタ 1 に比べて、クラスタ 9 は -100m 以前で速度の上昇がみられ、より上流側の交差点で停車したか、もしくは右左折により速度が低下した車両が多い。クラスタ 2 およびクラスタ 7 は、交差点前で信号待ちのため停車し、流出リンクでも信号待ちのため停車した車両が多い。クラスタ 1 とクラスタ 9 の関係と同様に、-100m 以前で速度低下している車両がクラスタ 7 に、速度低下していなかった車両はクラスタ 2 に分類された。クラスタ 3 は、交差点前で一度信号待ちのため停車し、その後速度を上げるが、右折のために交差点で速度を落として通過し、その後は速度を回復するパターンが多い。ただし、交差点前の信号待ちの位置は様々である。クラスタ 4 は、交差点前で 2 度信号待ちをしたのち、流出リンクでも 50m 以降に一度信号待ちをして流出している。クラスタ 5 は、交差点通過時に速度を落としたが、信号待ちをせず通過するような比較的速度が高い走行挙動が多い。一方で、交差点の直前や通過後の停車も現れており、様々な走行挙動が混在している。クラスタ 6 では、交差点の手前で一度信号待ちのため停車し、交差点通過後も、50m から 100m の地点で信号待ちのため停車して、その後流出している。クラスタ 8 は、-100m から 100m の範囲内で複数回停車している車両が多く分類されている。交差点付近で停車している車両は比較的数量が少ない。

次に、混雑度と先詰まりの観点から各クラスタを考察する。7時台に比べて、18~20時台では混雑していない。そこで、7時台と 18~20時台の割合を比較する。クラスタごとに台数が異なるため、クラスタ間の比較には、変化率を用いる。7時台および 18~20時台の各クラスタの割合と変化率を**表-3**に示す。クラスタ  $i$  の変化率  $X_i$  は、7時台のクラスタの割合を  $w_{7i}$ 、18~20時台の割合を  $w_{18\sim20,i}$  として、式(1)で求める。

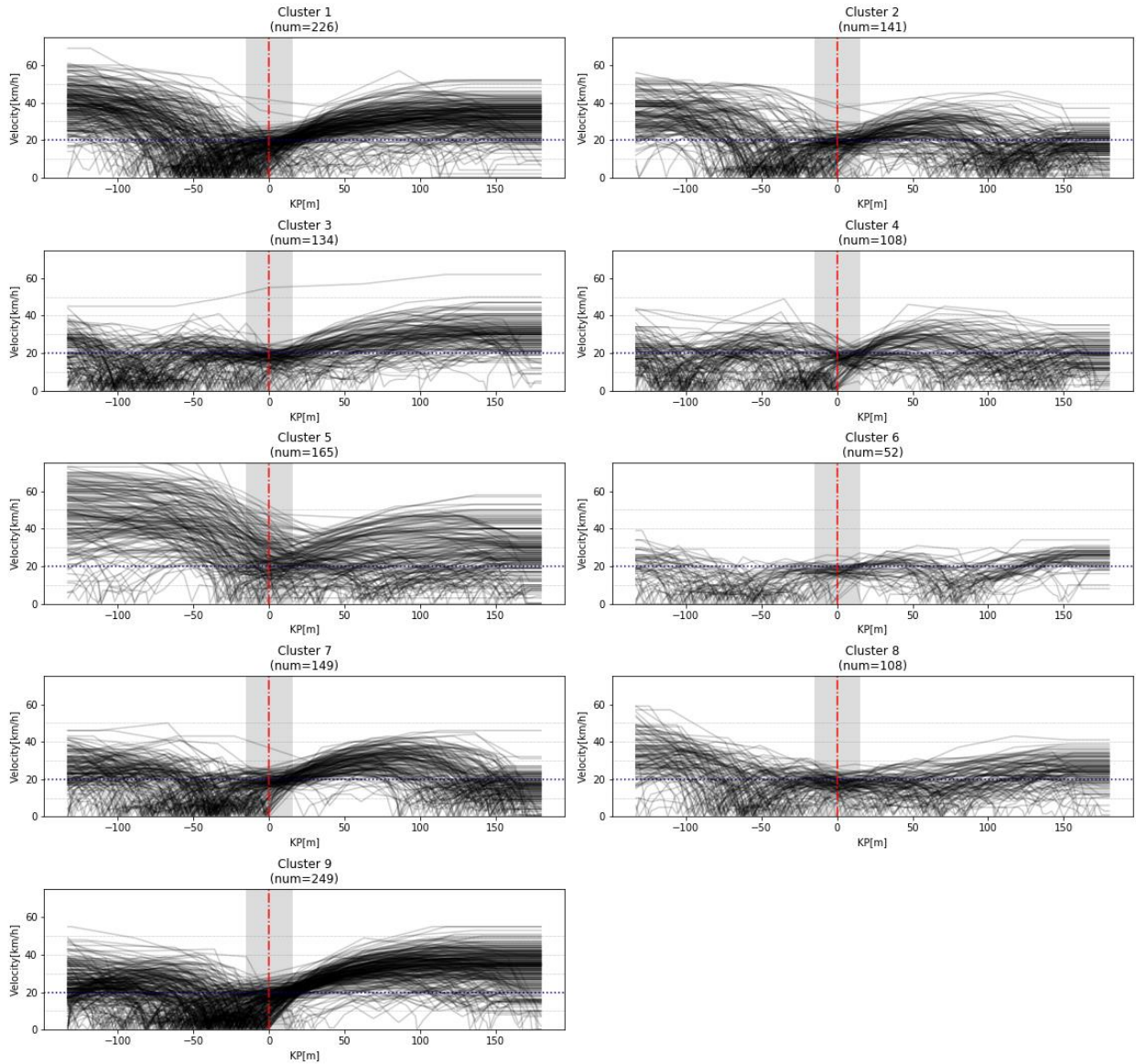


図-6 クラスタリング結果

表-3 7時台と18~20時台のクラスタ割合の比較

時間帯	車両数	クラスタ									合計
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
7	299	15.4	11.0	9.4	7.0	12.4	3.3	13.7	9.7	18.1	100.0
18~20	142	21.8	6.3	9.2	7.7	10.6	6.3	11.3	5.6	21.1	100.0
変化率		41.9	-42.6	-2.2	10.3	-14.6	89.5	-17.8	-41.9	17.0	

$$X_i = \left( \frac{w_{18\sim 20,i}}{w_{7,i}} - 1 \right) \times 100 \quad (1)$$

$X_i$ が正の場合は混雑時（7時台）に多い走行挙動の可能性が高い。 $X_i$ が正となったのは、クラスタ2, 7, 8であり、負となったのはクラスタ1, 6, 9であった。また、クラスタ3, 4, 5については、変化率が15%以下であり、ほとんど変化しない。つまり、クラスタ2, 7, 8は混雑時に、クラスタ1, 6, 9は非混雑時（18~20時）に多い走行挙動と考えられる。

非混雑時には、先詰まりの発生は見られなかった。一

方、混雑時には必ず先詰まりが発生するわけではなく、発生する場合と発生しない場合がある。交差点直後に停車するクラスタに分類された車両は、先詰まりの原因となっている可能性が高い。そのような走行挙動の車両は、クラスタ8に多い。一方でクラスタ2, 7では、車列が大正交差点まで伸びているかは分からず、先詰まりの原因となっているか否かの判別は難しい。

そこで各クラスタを、混雑と先詰まりの有無で分類する。混雑時（先詰まりあり）はクラスタ8、混雑時（先詰まり無し）はクラスタ2, 7、非混雑時はクラスタ1,

6, 9 とする。また、クラスタ 3, 4, 5 は分類できず、混雑時と非混雑時の両方が混在している。以下の結果より、分類の成否を確認する。総台数 1332 台に対して、分類できた台数は 925 台 (69%)、分類できなかった台数は 407 台 (31%) であった。つまり、上記手順では 7 割程度を判別したにすぎず、さらなる精度向上が求められる。

#### 4. おわりに

本研究では、プローブカーの走行挙動に着目した分析を行うことで、交差点で発生する先詰まりの現象の捕捉を試みた。交差点への流入リンクと流出リンクの速度を比較すると、先詰まりの影響を受けたと考えられる車両がみられた。また、各車両の走行挙動によって全車両をクラスタリングすることで、9 クラスタを得た。各クラスタを混雑時/非混雑時に分類し、混雑時に分類したものを、さらに先詰まりあり/なしに分類し、その結果 69% の車両を分類することが出来た。

クラスタリングに用いた k-Shape 法は、速度変化の傾向を重視する一方、速度や停車位置のずれは考慮されにくい。しかし、それらは先詰まりを検出するうえで、重要な指標である。特に横断歩道や停止線の位置の情報を用いると、停車位置に関してより詳細な分類も可能である。アルゴリズムや、その適用方法を工夫することで、精度向上が可能と考えられる。

また、先詰まりによる渋滞の拡大を取り扱うためには、隣接する複数交差点の影響を考慮しなければならない。そこで今後は複数交差点の影響を考慮した分析を行った

い。しかし、複数の交差点を扱うと、経路が膨大になるなどの問題から、今回用いた手法での分析は困難であり、交差点間の影響を考慮した分析手法を開発する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 橋本浩良, 水木智英, 高宮進: プローブデータを利用したボトルネック交差点とその影響範囲の特定方法, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 70, No.5, pp.I\_1159-I\_1166, 2014.
- 2) 清田裕太郎, 岩倉成志, 野中康弘: 東日本大震災時のグリッドロック現象に基づく都区内地道のボトルネック箇所の考察, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.70, No.5, pp.I\_1059-I\_1066, 2014.
- 3) 大島大輔, 大口敬: シングルグリッドネットワークにおけるグリッドロック現象の発生抑制方策に関する研究, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.74, No.3, pp.165-182, 2018.
- 4) 大島大輔, 大口敬: 交通流の車両構成比の遷移とグリッドロック現象形成過程の関係, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.74, No.3, pp.228-242, 2018.
- 5) 岩岡浩一郎: 信号交差点で構成されるシングルグリッドネットワークにおけるグリッドロック現象の分析, 交通工学論文集, Vol.3, No.2 (特集号 A), pp.A\_101-A\_108, 2017.
- 6) 田中伸治, 花房比佐友, 堀口良太, 桑原雅夫: 交通シミュレーションのグリッドロック問題解消策の検討, 生産研究, Vol.61, No.4, pp.751-754, 2009.
- 7) Paparrizos, J. and Gravano, L.: k-Shape: Efficient and Accurate Clustering of Time Series, SIGMOD'15, pp.1855-1870, 2015.

(?????????受付)

## CHARACTERISTICS OF DRIVING AROUND INTERSECTIONS BASED ON PROBE DATA

Hiroki MATSUMOTO and Makoto TSUKAI