

# 三次元プローブ軌跡データによる 大規模災害時の交通障害検出手法の提案

吉田政範<sup>1</sup>・三谷卓摩<sup>2</sup>・川崎洋輔<sup>3</sup>・桑原雅夫<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 東北大学 大学院情報科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)  
E-mail: masanori.yoshida.s4@dc.tohoku.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東北大学助教 大学院情報科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)  
E-mail: mitani@plan.civil.tohoku.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 東北大学研究員 大学院情報科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)  
E-mail: kawasaki-y@plan.civil.tohoku.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 東北大学教授 大学院情報科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)  
E-mail: kuwahara@plan.civil.tohoku.ac.jp

本研究は、三次元プローブ軌跡データを用いた大規模災害時の交通障害の検出方法を提案する。現状、大規模災害時の交通障害の把握は、CCTVや巡視員の目視による把握が主となっており、監視箇所が限定されるという課題がある。そこで、本研究では三次元（時間×二次元空間）のプローブ軌跡データを用いて広範囲かつ、リアルタイムに道路ネットワーク全体の交通障害を検出する手法を提案した。具体的には、熊本地震時の被災状況と三次元プローブ軌跡データの特徴を分析した。その特徴を踏まえ、平常時と災害時にリアルタイムに収集される三次元プローブ軌跡データの類似度算出から交通障害による異常な挙動の車両を検出する手法を提案した。手法検証の結果、三次元プローブ軌跡データのみで交通障害を検出可能であることを確認した。

**Key Words** : *large-scale disaster, probe vehicle trajectory, traffic fault detection, levenshtein distance*

## 1. はじめに

近年、東日本大震災をはじめとして、世界的な規模で大規模災害が頻発している。こうした大規模災害時には、道路の崩落や火災等に巻き込まれる二次災害を防ぐために、交通障害の迅速な検知が必要と考えられる。しかしながら、現在の交通障害の検知手段は、道路に設置されたCCTVやパトロールカーによる巡回および地域住民からの通報が主となっている。CCTVはカバー範囲が限定的であるため、CCTVのない場所では、パトロールカーの巡回による現地での目視確認が必須である。災害時に、道路の寸断や避難車両の集中による渋滞といった交通障害が発生した場合、交通障害発生箇所から遠く離れた施設巡視が困難になる。そのため、交通障害の検知遅れによる道路の通行規制のタイミングへの影響が懸念される。

一方、こうした交通障害検出のリソースとして、プローブ軌跡データがある。プローブ軌跡データは、車両感知器やCCTVといった従来の設置型のセンサーに比べて広範囲かつ詳細な車両挙動の把握が可能であるという特徴があり、交通障害検知に有用であると考えられる。

そこで、本研究では、三次元プローブ軌跡データを用

いた交通障害を検出する手法を提案した。

本論文の構成は次の通りである。第1章では、研究の背景と論文の構成を示した。第2章では、災害時の交通実態把握と交通障害検出の既往研究について整理し、それらを踏まえた本研究の貢献を述べる。第3章では、大規模災害の一例として、熊本地震時の被災状況の整理と三次元プローブ軌跡データの特徴分析を行う。第4章では、その特徴を踏まえ、交通障害を検出する手法を提案する。第5章では、提案手法の検証として、交通障害の中でも熊本地震時の道路損傷箇所を対象として、異常な挙動の車両を検出し、三次元プローブ軌跡データのみで交通障害を検出可能であることを示す。最後に、第6章では本研究のまとめと今後の課題を述べる。

## 2. 既往研究の整理

本章では、既往研究を災害時の交通実態把握と交通障害検出の2つの視点で整理する。最後に既往研究を踏まえた本研究の貢献について述べる。

### (1) 災害時の交通実態把握に関する研究

Zhu et al.<sup>1)</sup>は、車両感知器、バス利用者統計及びアンケート調査を用いて I-35W 橋崩壊後の交通パターンの変化を分析している。分析の結果、I-35W 橋付近の高速道路の交通パターンには一時的な変化が生じたが、崩壊後の交通需要はそれほど変化しなかったことを示した。しかし、車両感知器の観測箇所は限定的であり、道路ネットワーク全体の交通実態は把握できない。また、アンケート調査は、被験者の想起に基づいているため必ずしも結果が正しいとは限らず、調査に時間を要するため多くのサンプルを入手することが困難である。一方、携帯電話やカーナビから収集されるプローブ軌跡データは、道路ネットワーク全体のトリップの経路や速度を詳細に把握することができる。

プローブ軌跡データを用いた研究には、Bengtsson et al.<sup>2)</sup>、Lu et al.<sup>3)</sup>、Hara et al.<sup>4)</sup>、Kawasaki et al.<sup>5)</sup>がある。Kawasaki et al.は、2016 年 4 月の熊本地震での都市内交通と避難行動の実態をプローブ軌跡データを使って分析している。具体的には、九州自動車道の通行止めの影響を受け、福岡方面から熊本中心部への代替経路の日中の旅行時間が平常時に比べて大きく増加したこと、避難所やスーパー、銭湯などが新たな発集点となり、平常時とは違った交通渋滞を引き起こしていたことなどを、プローブ軌跡データを用いて定量的に明らかにしている。

以上より、災害時の交通実態把握のためにプローブ軌跡データを用いることは、有効な手段と考えられる。

### (2) 交通障害検出に関する研究

Cullip et al.<sup>6)</sup>、Kawasaki et al.<sup>7)</sup>等は、車両感知器による交通量やオキュパンシー、もしくは車線別の速度差等の統計量について、平常時と交通障害発生時での差異を分析し、平常と異常を判別する閾値を設定している。そして、新たに得られた車両感知器データを閾値によって平常か異常か判別することで交通障害検出を試みている。

次に、プローブ軌跡データを用いた交通障害検出の研究は関塚ら<sup>8)</sup>、Asakura et al.<sup>9)</sup>等がある。これらの研究では、交通障害発生時の二次元（時間×走行距離）上の車両軌跡の変曲点間をつないだ衝撃波面に着目し、交通障害発生時間と場所を推定している。

本節で取り上げた研究は全て高速道路を対象に行っており、車両感知器の設置やアクセスコントロールが適用条件となっているため、この手法を一般道を含めた道路ネットワークにそのまま適用することはできない。また、時間×走行距離の二次元プローブ軌跡データを評価しており、災害時の一般道上での道路損傷箇所付近での徐行や停止、もしくは損傷箇所の迂回のような車両挙動は把握できないといった課題も有している。

本研究と同様に、一般道を対象とした研究にはCai

et al.<sup>10)</sup>がある。この研究では、交通障害発生時に一般道交差点の進入区間で生じるふらつきや車線逸脱を“異常挙動”と定義し、プローブ軌跡データのみで異常挙動を検出することを試みている。事前に平常時と異常挙動の車両軌跡が属するクラスターとパターンのデータベースを構築し、新たに得られた軌跡が異常挙動のクラスターに分類されれば、その軌跡を異常挙動（交通障害の発生）として検出している。この研究は、車線逸脱や事故時の交差点進入部での車両挙動を対象にしており、災害時の道路ネットワークでの交通障害検出を対象にしていない。

### (3) 本研究の貢献

前節までの既往研究の成果を踏まえ、プローブ軌跡データを用いた本研究の貢献を以下に記載する。

- 1) 大規模災害時の特徴分析：大規模災害時のプローブ軌跡データを分析した国内の事例は少ない。この理由は、プローブ機器（カーナビ、スマホ等）のデータ収集・活用の仕組みが近年になって整ってきたこと、災害の発生が稀であることが考えられる。したがって、国内で災害時のプローブ軌跡データを分析した事例は、東日本大震災の Hara et al.<sup>4)</sup>や熊本地震の Kawasaki et al.<sup>5)</sup>等の災害のみである。
- 2) 三次元データを用いた交通障害検出手法の提案：前節で述べた通り、既往研究では、交通障害発生時の時間×走行距離の二次元プローブ軌跡データを活用している。本研究では、ドットデータである三次元（時間×二次元空間）のプローブ軌跡データを用いた交通障害検出手法を提案する。本手法の特徴は、
  - ・三次元のプローブ車両軌跡挙動を考慮した評価ができること
  - ・プローブ軌跡データをネットワークデータに依存しないドットデータとして活用することにより、ネットワークデータの準備なしに細街路も含めたネットワーク全体での評価が高速でできること
 が挙げられる。
- 3) 交通障害検出の可能性の提示：本研究では、提案手法を、大規模災害の一例である熊本地震時の道路損傷箇所に適用し、検証を行った。その結果、道路損傷箇所を迂回する 2 車両を検出できた。これは、三次元プローブ軌跡データのみで、交通障害の検出可能性を示したといえる。交通障害の自動検出が可能になれば、災害時の道路管理・交通規制の意思決定に貢献できると考えられる。

### 3. 熊本地震時の三次元プローブ軌跡データの特徴分析

本章では、2016年4月に発生した熊本地震時の被災状況の整理と三次元プローブ軌跡データの特徴分析を行う。

まず、熊本地震時の被災状況の概要を以下に述べる。

熊本地震では、熊本県熊本地方を震央とした、前震、本震の2回大きな揺れが発生した。前震は、4月14日21時26分ごろに発生し、マグニチュード6.5、最大震度7を記録した。続く本震は、16日1時25分ごろ発生し、マグニチュード7.3、最大震度7を記録した。尚、本研究では16日の本震発生を被災とする。また、地震後の一般道路の状況を見ると、道路に段差、亀裂、陥没、崩落等が生じたことにより、主要幹線道路や生活道路の多数の箇所において通行止め等の交通規制が行われた。

続いて、発災時と平常時の三次元プローブ軌跡を可視化し、特徴分析を行う。可視化対象は、熊本県熊本市の国道3号線松崎跨線橋付近を含む、三次メッシュ番号49301587～49302508の計6メッシュとし、図-1に示す。松崎跨線橋付近では、発災時に道路損傷が発生し、2時30分ごろから通行止め規制が行われた。図-2、図-3に、発災時と平常時の午前0時～3時の三次元プローブ軌跡を示す。同図の横軸 (Lon) は経度、縦軸 (Lat) は緯度、高さ (Time) は時刻を示す。尚、本研究では発災1週前の4月9日を平常時とした。

発災時と平常時の比較による三次元プローブ軌跡の特徴を以下に記載する。

- 1) 発災後 (1:25以降) のプローブ車両の急増：平常時と比較すると、発災後にプローブ車両の急増が確認される。また、発災後に急増したプローブ車両は、発災直後から同じ場所に停止しているものが多い。これは、発災後に自動車に避難した人々の車両軌跡と推察される。
- 2) 三次元プローブ軌跡の差異：平常時は、スムーズに道路上を走行している車両が大半である。一方、発災時は、周辺をうろつく車両等の平常時と形状が異なる軌跡がみられる。以上より、発災時と平常時を比べると、軌跡間の差異として発災時の交通障害の痕跡があらわれると推察される。



※表示番号は三次メッシュ番号

図-1 可視化対象エリア

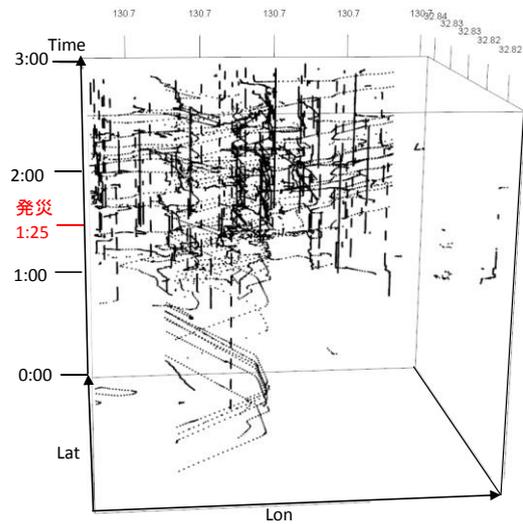


図-2 発災時 (201604/16 0~3時) の三次元プローブ軌跡

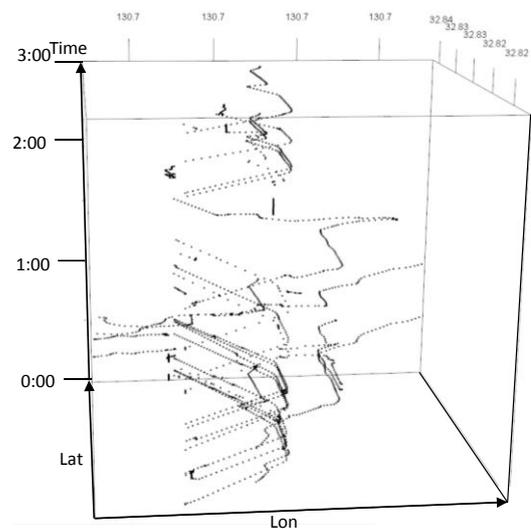


図-3 平常時 (201604/09 0~3時) の三次元プローブ軌跡

#### 4. 三次元プローブ軌跡データによる交通障害検出手法の構築

本章では、三次元プローブ軌跡データを用いた交通障害検出手法を提案する。

##### (1) 交通障害検出の考え方

前章で述べた通り、道路損傷による交通障害が発生した場合、三次元プローブ軌跡に差異があらわれる。そのため、この差異を定量的に評価できれば、交通障害の検出が可能と考える。そこで、本研究では、平常時と発災時の三次元プローブ軌跡間の類似度を算出する。そして、類似度が小さい(=差異が生じている)車両を“異常車両”として検出する。

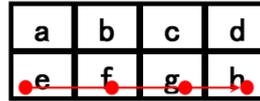
軌跡の類似度算出に関する既往研究について述べる。山本ら<sup>11)</sup>は、二次元空間上の軌跡のドットデータの観測誤差を考慮するために軌跡を文字列に変換し、文字列の類似度を軌跡間の類似度として算出している。具体的には、空間を微小区間で分割し、メッシュを作成する。そして各メッシュに文字(アルファベット)を付与し、ドットを所属するメッシュの文字に変換することで、軌跡を文字列に変換する。本研究では、この軌跡を文字列に変換する手法を三次元プローブ軌跡の文字列変換に用いて、以下の手順で三次元プローブ軌跡の類似度から交通障害を検出する。

- 1) 三次元プローブ軌跡の文字列変換
  - 2) 文字列間の類似度算出による交通障害検出
- 次節より上記の具体的な内容を述べる。

##### (2) 三次元プローブ軌跡の文字列変換方法

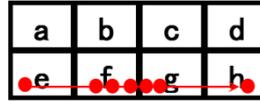
三次元プローブ軌跡を文字列変換する方法について述べる。まず、時間を微小時間 $\Delta t$ 、二次元平面を微小区間 $\Delta x, \Delta y$ で分割した時空間を考える。次に、二次元平面を $\Delta x, \Delta y$ で区切られた平面上のメッシュに固有の文字を付与する。そして、 $\Delta t$ 毎に、プローブ車両の位置情報を平面上のメッシュに対応した文字を割り付けることで、プローブ軌跡を文字列に変換する。図-4に $\Delta t$ を観測間隔とした場合のプローブ軌跡の文字列変換イメージを示す。同図の上段は平常時、中段は速度低下(一時停止)時、下段は迂回時のプローブ軌跡の変換イメージを示している。同図に示すように、提案手法では、速度低下(一時停止)および迂回といった時空間上のプローブ軌跡の違いを異なる文字列で表現していることが分かる。以降、このプローブ軌跡変換後の文字列を軌跡文字列、軌跡文字列を形成する文字を軌跡文字と呼ぶこととする。

平常時



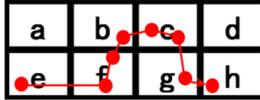
文字列: e f g h

速度低下時



文字列: e f f g h

迂回時



文字列: e f f b c c g h

図-4 プローブ軌跡の文字列変換イメージ

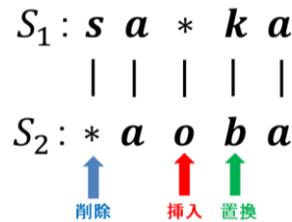


図-5 レーベンシュタイン距離の算出例

##### (3) 文字列間の類似度による交通障害検出手法

本研究では、レーベンシュタイン距離によって文字列の類似度を算出する。算出の手順として、ある1つの文字列を他の文字列に変換する際に、文字列の「編集」(文字の挿入、削除、置換)を行う度にコストに1を追加する作業を行い、「編集」の回数が最小になるように文字列を変換したときのコストを求める。文字列の「編集」の回数が多いほど距離は大きくなり、文字列の類似度(差異)を評価できる。図-5に、文字列”saka”を文字列”aoba”に変換するレーベンシュタイン距離の算出例を示す。同図の例では、「編集」の最少回数は3回であり、レーベンシュタイン距離は3である。

既往文献<sup>12)</sup>より以下に、レーベンシュタイン距離による軌跡文字列間の類似度算出方法を定式化する。

長さ  $n$ 、 $m$  の 2 つ の 軌 跡 文 字 列 を、 $S_1 = \{\alpha, \alpha_1, \dots, \alpha_n\}$ 、 $S_2 = \{\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m\}$  と表す。また、 $\alpha_i (0 \leq i \leq n)$  を  $S_1$  中 の  $i$  番 目 の 軌 跡 文 字、 $\beta_j (0 \leq j \leq m)$  を  $S_2$  中 の  $j$  番 目 の 軌 跡 文 字 と する。2 軌 跡  $S_1$ 、 $S_2$  間 の レーベンシュタイン距離  $L(m, n)$  は、以下の漸化式(1)で定義される。

$$\begin{aligned}
 &0 \leq i \leq n, 0 \leq j \leq m \\
 &L(i, j) \\
 &= \max(i, j) \quad \text{if. } \min(i, j) = 0 \\
 &= \min \begin{cases} L(i-1, j-1) + c(\alpha_i, \beta_j) \\ L(i, j-1) + 1 \\ L(i-1, j) + 1 \end{cases} \quad \text{otherwise} \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\text{where } c(\alpha_i, \beta_j) = \begin{cases} 0 & (\alpha_i = \beta_j) \\ 1 & (\alpha_i \neq \beta_j) \end{cases}$$

ここで、 $c(\alpha_i, \beta_j)$ は文字の置換操作のコストである。次章では、レーベンシュタイン距離を用いた軌跡の類似度算出による検証結果を述べる。

### 5. 提案手法の検証結果

本章では、提案した手法を熊本地震時の道路損傷箇所に応用し、異常車両を検出可能であることを検証する。まず、平常時と発災時の三次元プローブ軌跡を比較するためにレーベンシュタイン距離を用いることで類似度を算出し、一定以上差異が生じている車両を異常車両として検出する。

対象車両は、図-6に示す通行止め箇所である国道3号線・松崎跨線橋の前後に存在する室園交差点、化血研前交差点の2交差点を通過したプローブ車両とする。図-7に示す4月9日0時25分に室園交差点を通過したプローブ車両の軌跡を平常時の基準プローブ軌跡データと設定した。発災時の車両として、4月16日の0時~3時に室園交差点を通過し、その後化血研前を通過した車両を検出対象とした。



図-6 検証対象エリア



図-7 平常時のプローブ軌跡 (二次元)

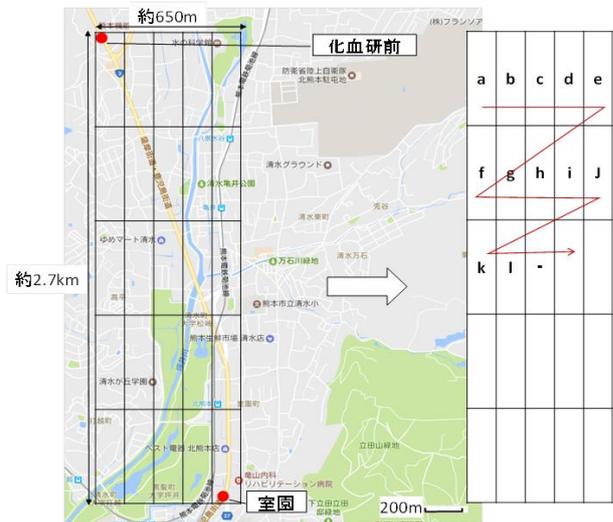
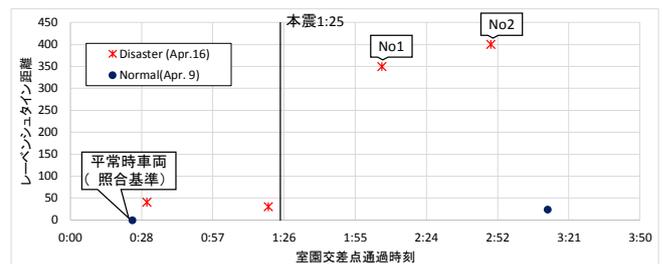


図-8 二次元平面の分割設定



次に、時空間の分割方法を設定する。時間分割ピッチは、プローブ軌跡データの取得ピッチと同様とし、二次元平面は、図-8のように対象箇所付近を5x5のセルに分割し、各セルに対しアルファベットを付与した。

以下に、提案手法による三次元プローブ軌跡の類似度算出結果を示す。図-9に、横軸に室園交差点の通過時間、縦軸にレーベンシュタイン距離算出結果を示す。平常時



車両の性質（台数，データ取得間隔，車種等）によって適切なサイズが異なると考えられる。どのように適切なメッシュサイズを設定するかは今後の検討課題である。

- 3) 異常判定の閾値の設定：今回はレーベンシュタイン距離の算出結果から，著者らが感覚的に異常と思われる車両を検出した。検出の自動化を図るためには，異常判定を行うための閾値の検討が必要と考える。Zheng et al.<sup>13)</sup>は，二次元平面の軌跡の類似度を算出するため，2つの軌跡のドット間のユークリッド距離を用いた様々な手法を提示している。こうした既往研究を参考にして，引き続き，三次元プローブ軌跡の異常判定を行うための閾値を検討する必要がある。
- 4) 他の災害事例への適用：本手法の汎用性検証のためには，他の災害事例へ適用し，精度検証することが必要と考えられる。

**謝辞：**本研究は，JSPS科研費26220906 及び，独立行政法人情報通信研究機構の「ソーシャル・ビッグデータ活用・基盤技術の研究開発（課題178A09）」プロジェクトより助成を受けたものである。ここに記して感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) Zhu, S., Levinson, D., Liu, H. X. : Kathleen Harder: The traffic and behavioral effects of the I-35W Mississippi River bridge collapse, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol.44, Issue 10, pp. 771-784, 2010.
- 2) Bengtsson, L., Lu, X., Thorson, A., Garfield, R., von Schreeb, J. : Improved response to disasters and outbreaks by tracking population movements with mobile phone network data: a post-earthquake geospatial study in Haiti, *PLoS Med.*, Vol.8, No.8, p. e1001083, 2011.
- 3) Lu, X., Bengtsson, L., Holme, P. : Predictability of population displacement after the 2010 Haiti earthquake, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, Vol. 109, No.29, pp. 11576-11581, 2012.
- 4) Hara, Y., Kuwahara, M. : Traffic Monitoring immediately after a major natural disaster as revealed by probe data - A case in Ishinomaki after the Great East Japan Earthquake, *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, Vol. 75, pp. 1-15, 2015.
- 5) Kawasaki, Y., Kuwahara, M., Hara, Y., Mitani, T., Takenouchi, A., Iryo, T. and Urata, J. : Investigation of Traffic and Evacuation Aspects at Kumamoto Earthquake and the Future Issues, *Journal of Disaster Research*, Vol.12, No.2, 2017.
- 6) Cullip, M. and Hall, F. : Incident Detection on an Arterial Roadway, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol.1603, pp.112-118, 1997.
- 7) Kawasaki, Y., Tanaka, A., Goto, H., Takada, J., Warita, H., Hong, S., Tanaka, S. and Kuwahara, M. : Research on Mechanisms to Provide Attention-attracting Information Effective in Preventing Rear-end Collisions, *18th ITS World Congress*, 2011.
- 8) 関塚貴一，三谷卓摩，川崎洋輔，益田卓朗，永井慎一，桑原雅夫：車両軌跡のみを用いた突発事象発生時の旅行時間予測，土木計画学研究・講演集，Vol.53，CD-ROM，2016.
- 9) Asakura, Y., Kusakabe, T., Nguyen, L., X., and Ushiki, T.; Incident Detection Methods using Probe Vehicles with on-board GPS Equipment, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, In press*, 2016.
- 10) Cai1, Y., Wang,H., Chen1, X., Jiang, H. : Trajectory-based anomalous behaviour detection for intelligent traffic surveillance , *IET Intelligent Transport Systems* , Vol.9, pp. 810–816, 2015.
- 11) 山本雅大，栗田和宏，笹川裕人，有村博紀：2次元軌跡データに対する高速なパターン照合アルゴリズム(d分野：データベース，一般論文)．情報科学技術フォーラム講演論文集，Vol.13，No.2，pp.153-154，2014.
- 12) 三浦直子，高木友博：語の影響度と編集距離を用いた文の類似度計算手法，言語処理学会第21回年次大会発表論文集，D1-3，2015.
- 13) Zheng, Y., Zhou, X. : Computing with Spatial Trajectories (Chapter 2 : Trajectory Indexing and Retrieval), *Springer*, pp.35-60, 2011.

(2017.7.31 受付)

## PROPOSAL OF DETECTION METHOD OF TRAFFIC FAULT UNDER LARGE-SCALE DISASTER BY PROBE VEHICLE TRAJECTORY

Masanori YOSHIDA Takuma MITANI, Yosuke KAWASAKI,  
and Masao KUWAHARA

In this study, we propose a method to detect traffic fault in case of large-scale disasters using probe trajectory data.

In the event of a large-scale disaster, the present situation to grasp the disaster situation is mainly based on the visual observation of CCTV and patrol personnel. The monitoring area is limited. In this study, we proposed to construct a method to detect the traffic fault of the entire network in real time using the probe trajectory data. Specifically, we analyzed the damage and probe trajectory data at the time of the Kumamoto earthquake and arranged the features of the probe trajectory data at the time of disaster. Considering the features, we have constructed a method to detect traffic fault from the calculation of similarity of the three-dimensional probe trajectory data collected in real time. As a result of the verification, we showed that it is possible to detect an abnormal behavior vehicle at a road damage part only by the three-dimensional probe trajectory data.