

# 車両軌跡データを用いた 通行止めによる混雑の拡散・収束分析

イ インホ<sup>1</sup>・安藤 宏恵<sup>2</sup>・中西 航<sup>3</sup>・朝倉 康夫<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生非会員 東京工業大学 土木・環境工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1-M1-20)

E-mail: lee.i.aa@m.titech.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 熊本大学助教 くまもと水循環・減災研究教育センター (〒860-8555 熊本市中央区黒髪2-39-1)

E-mail: hiroeando@kumamoto-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 東京工業大学助教 環境・社会理工学院 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1-M1-20)

E-mail: nakanishi@plan.cv.titech.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 東京工業大学教授 環境・社会理工学院 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1-M1-20)

E-mail: asakura@plan.cv.titech.ac.jp

現在、日本は社会資本の老朽化を迎え、利用者の多い高速道路の改修工事も頻繁に行われている。とくに集中工事となる大規模改修工事では車線規制や通行止めを伴い、周辺地域に大きい影響を与える。しかし、その影響に関する研究は数少ない。本研究では、阪神高速道路湾岸線リニューアル工事の影響分析をおこなうため、プローブデータをメッシュ単位で集計し、工事前後の交通状況の変化を面的に把握した。さらに、集塊性指標と中心性指標の適用により、混雑の拡散・収束を定量的に表現した。その結果、車線規制工事よりも通行止め工事が周辺に大きい影響を与え、工事の期間中には新たな均衡状態まで至らないことが明らかになった。

**Key Words** : *probe data, mesh statistics, intensive construction, agglomeration, network centrality*

## 1. はじめに

### (1) 背景と目的

日本の社会資本の多数は高度成長期に整備されたため、現在深刻な老朽化を迎えている。それに伴い、高速道路会社も大規模改修工事を伴うリニューアルプロジェクトを実施している。大規模な工事の方法として多く採用されている集中工事は、短期間、低コストで実施でき、さらには、根本的問題解決ができるなどの長所がある。しかし、交通量の多い高速道路での実施において周辺部に与える影響が大きく、適切な対策が必要になる。ところが、集中工事の影響に関する研究は少なく、事後分析もできていない場合が多い。

また、IoT技術の発展により、位置情報を記録した車両軌跡データの取得と利用が容易になっている。これらの車両軌跡データはマップマッチング処理後、道路ネットワーク上で分析されることが一般的である。しかし、道路ネットワークの詳細度に依存するため小さな道路の情報は省略されてしまう場合があること、現在の方法で

は膨大なデータを迅速に処理するのは現実的ではないことなどが課題である。

以上の背景を踏まえ、実際の高速道路集中工事が周辺部に与える影響を捉えるため、対象地域をメッシュ分割したグリッド単位で車両軌跡データを集計、分析する。マップマッチング処理を行うことなくグリッド単位で分析することにより、膨大なデータを速い処理速度で分析することが可能となり、道路の規模にかかわらず全てのデータを対象とすることができる。実際の高速道路集中工事の事例を対象に、通常時、車線規制工事時、通行止め時の交通状況を分析、視覚化することにより、工事をもたらす影響の違いを明らかにする。さらに、集中工事の影響により混雑する区域が時間経過に応じて拡散・収束する現象について定量的評価を行う。

### (2) 本研究の位置付け

例えばミネアポリスI-35W橋の崩壊事件による影響を分析したZhuらなどにみられるように、災害や事故による突発的な道路途絶の影響に関する研究は多数存在する

が、高速道路の集中工事のような事前周知が可能な通行止めについて事例を対象とした影響分析はあまり多くない。車両感知器データを用いた研究としては、藤田ら<sup>2)</sup>の名古屋高速道路の集中工事に関する研究があげられる。工事による交通状況の変化を時間帯別交通量配分モデルを用いて再現、車両感知器データとの比較により有用性を検証した。プローブデータを用いて集中工事の影響分析した事例では、井上ら<sup>3)</sup>による阪神高速道路の守口線集中工事、安藤ら<sup>4)</sup>による阪神高速道路の湾岸線集中工事の分析事例があげられる。マップマッチング処理後の車両軌跡データを用いて、道路ネットワーク上における影響分析が行われている。嶋本ら<sup>5)</sup>は小戸之橋の建て替え工事による影響を、メッシュ単位でのプローブデータの集計、自己組織化マッピング方式を利用、地域のグループ化を行った。また、福田ら<sup>6)</sup>は、プローブデータのエリアレベルでの集計を用いて、時間信頼性評価手法を提案した。

これらの研究は各メッシュや経路ごとの交通状況の変動に着目していることがほとんどであるのに対し、本研究は対象区域全体における混雑の空間的拡散・収束の表現に着目している。

## 2. 使用データ概要

### (1) 阪神高速湾岸線リニューアル工事

阪神高速では、2019年11月6日(水)～20日(水)に4号湾岸線(南港北～三宝)の延長4.7km区間において終日車線規制、2019年11月20日(水)～30日(土)に4号湾岸線(南港北～大浜)の延長8.8kmと6号大和川線(三宝～鉄砲)の延長1.4kmにおいて終日通行止めを行った。影響の分析範囲として、工事区間が含まれる日本測地系の

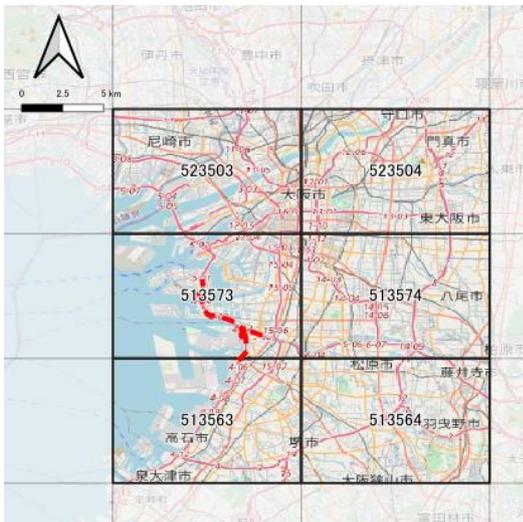


図-1 分析範囲

6つの2次メッシュ(各メッシュサイズ10km×10km)の区域を用いる。(図-1)

### (2) 商用車プローブデータ

今回使用したプローブデータは富士通交通・道路データサービスより提供いただいたデータであり、事業用トラックに限定し収集されている。ネットワーク型デジタルタコグラフの情報をもとに、道路整備・安全向上や物流の高度化などを目的に事業者の許諾を得て収集・蓄積し、営業情報・企業情報を秘匿化した形で提供されたものである。商用車の特定ID付きの1秒間隔のドットデータを利用し、その中には集計時刻、緯度経度、速度、加速度、などが記載されている。本研究では集計時刻、緯度経度、速度を用いる。

データの取得期間は2019年10月23日から11月30日までの39日間である。分析範囲を通る車両台数の平均は、平日11,798台(最小:11,516台,最大:12,014台)、週末・祝日7,030台(最小:4,269台,最大:11,955台)である。

## 3. 分析方法と結果

### (1) メッシュ集計に基づく影響評価

#### a) 分析方法

車両軌跡を空間単位で集計するため、Edieの定義に従い集計を行う。各メッシュと時間の3次元空間(図-2)を通過する車両を集計対象として判断する。対象領域をA、車両を*i*としたとき、領域内を走行する車両の走行距離 $D(A)$ 、走行時間は $T(A)$ は以下の式(1)、(2)で集計できる。 $n(A)$ は領域Aを通過する車両の集合を表す。

$$D(A) = \sum_{i \in n(A)} d_i \quad (1)$$

$$T(A) = \sum_{i \in n(A)} t_i \quad (2)$$

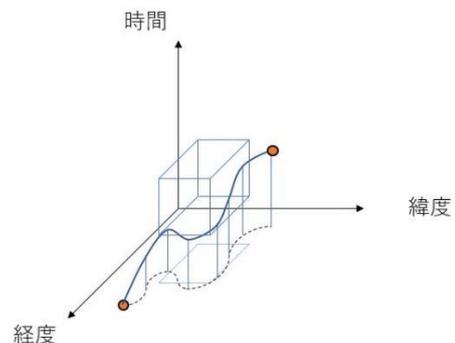


図-2 集計概念図

領域 A 内の速度，密度，交通量の中で，速度  $V(A)$  のみはプローブ車両が領域内で一様に走行しているという仮定の下で，混入率と関係なく計算することが可能である<sup>9)</sup>。

$$V(A) = D(A)/T(A) \quad (3)$$

集計領域のサイズによる違いを確認するため，3次メッシュ (1 km × 1 km)，4次メッシュ (500 m × 500 m)，5次メッシュ (250 m × 250 m) の三種類で集計を行う。さらに，高速道路路線別に，道路が通過するメッシュの連続体を新たな領域 (以下，コリドー) として集計を行うことで，路線全体としての影響を把握する。(図-3) また，高速道路が通過するメッシュを高速道路メッシュ，その他のメッシュを一般道路メッシュとする。

b) 結果

工事による周辺部の変化の特徴を把握するため，同曜

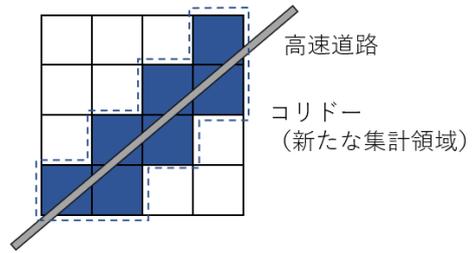
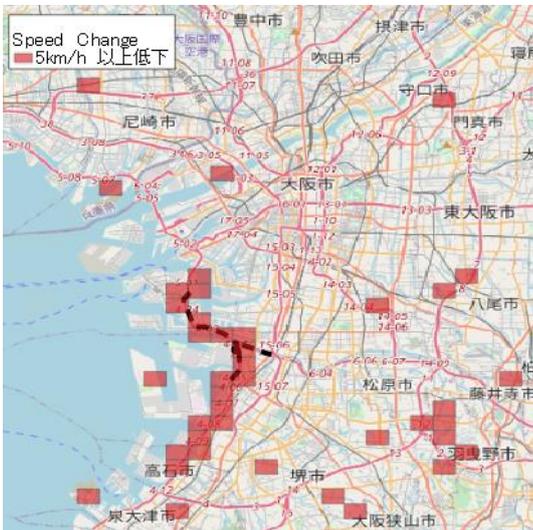
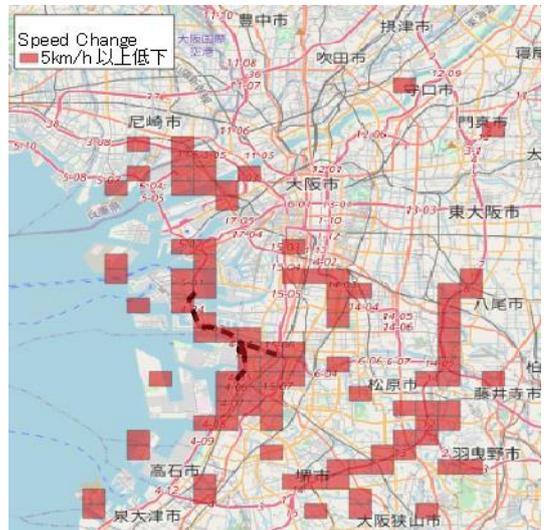


図-3 高速道路コリドー概念図

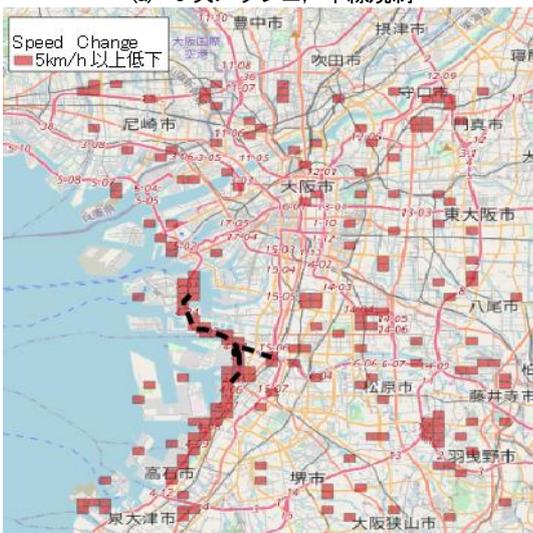
日，同時帯の朝の時間帯 (7:00-10:00 am.) において通常時 (2019年10月24日)，車線規制時 (2019年11月7日)，通行止め時 (2019年11月21日) の比較を行う。図-4は車線規制時と通行止め時のそれぞれ通常時から5 km/h 以上速度低下した領域を示す。集計領域単位は3次



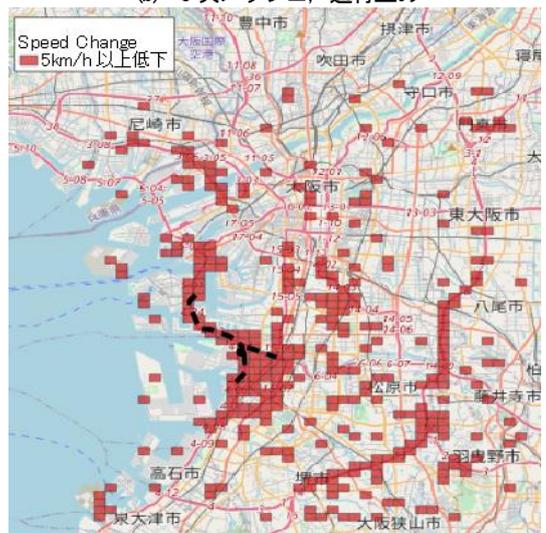
(a) 3次メッシュ，車線規制



(b) 3次メッシュ，通行止め



(c) 4次メッシュ，車線規制



(d) 4次メッシュ，通行止め

図-4 工事による速度低下領域

メッシュと4次メッシュであり、破線は工事区間を示す。

車線規制時には、速度低下を示す領域は工事対象になる4号湾岸線（3次メッシュコリドー基準、19.68%速度低下）に集中している。通行止め時には、利用不可能となった工事区間を含む湾岸線のみならず、周辺部に混雑が拡散していることが確認できる。これは、湾岸線を利用していた車両の工事区間周辺からの迂回による現象だと判断される。

地図上の東側に位置する工事区間と離れた連続体は近畿自動車道（3次メッシュコリドー基準、紀勢線17.57%、名古屋・大阪線6.53%速度低下）を含む領域であり、あらかじめ遠い迂回を選択した車両が集中したことによる速度低下と判断される。

また、平均速度と同様に通過交通量と総移動距離の観点からも車線規制と通行止めによる影響を確認した。通過交通量と総移動距離は多少の違いは存在するが、類似した傾向が確認できた。総移動距離は通過交通量の台数に依存するため、強い相関を持つためだと推測される。通過交通量は工事区間を含む4号湾岸線と連結する5号湾岸線において、車線規制と通行止め時ともに低下した。車線規制時と通行止め時の違いは、通行止め時は工事区間周辺部のみならず、工事区間より南から湾岸線に沿う一般道路、近畿自動車道名古屋・大阪線を含む領域も通過交通量が増加していることがあげられる。どちらもあらかじめ湾岸線の利用を避け、迂回を選択した車両による結果だと推測される。

さらに、高速道路の一部が利用不可能となったことによる一般道路への車両の流入も確認できた。4次メッシュを基準として、通常時は一般道路メッシュの平均通過交通量は15.37（台/時）、高速道路メッシュは153.32（台/時）だったことに対して、通行止め時は一般道路メッシュは16.19（台/時）、高速道路メッシュは140.71（台/時）であった。これにより、高速道路のみに迂回が発生したのではなく、一般道路へ流出した車両も多数存在し、一般道路における混雑の要因になったと推測される。

メッシュサイズの縮小に伴い、細かい領域での情報が得られるため、速度変化や通過交通量変化図から特定の路線を類推することが可能になる。また、高速道路コリドーでは、メッシュサイズが縮小することにより直交する国道等の周辺道路による影響が少なくなる（例えば、**図-5**のメッシュサイズの縮小に伴う守口線における平均速度の増加）。しかしながら、メッシュサイズが小さくなると通常時と通行止め時の両方にデータが存在する領域の比率は3次メッシュで91.0%、4次メッシュで81.46%、5次メッシュで62.44%と低下することが確認できる。そのため、各領域が持つデータ数が少なく車両1

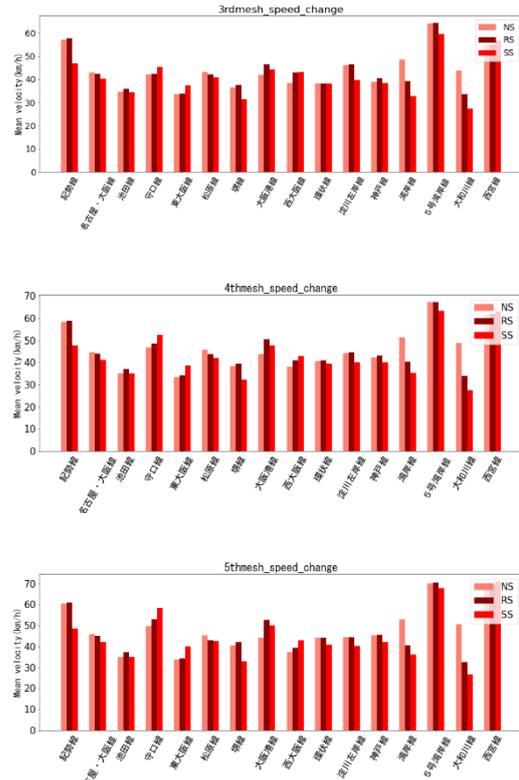


図-5 メッシュサイズ別の高速道路速度変化 (NS: 通常時, RS: 車線規制時, SS: 通行止め時)

台ごとの影響が大きくなり、集計値の信頼性低下が懸念される。

(2) 集塊性指標に基づく影響評価

a) 分析方法

混雑の拡散・収束を定量的に把握するため、都市計画の土地利用分析で使われる集塊性指標を利用し評価を行う。集塊性指標はメッシュ土地利用データから同一の土地利用がどれほど集積し存在するのかを表す指標<sup>7)</sup>である。

異なる平均速度を持つ領域を、工事による速度変化の値で分類するのは適切ではない。そのため、通常時のデータを用いた標準化を通じて、比較可能となるように前処理を行う。対象メッシュ  $m$  に対して、通常時平日の 7:00~10:00 am の平均速度  $\bar{v}_m$ 、標準偏差  $\sigma_m$  を基準とし、 $d$  日の同一時間帯の速度  $v_{m,d}$  を標準化する (式 (4))。その後、標準化した値  $z_{m,d}$  が -1 以下のメッシュを渋滞メッシュとして扱う。

$$z_{m,d} = \frac{v_{m,d} - \bar{v}_m}{\sigma_m} \quad (4)$$

分析に用いる集塊性指標はクラス値<sup>8)</sup>である。まず、全体メッシュ空間の中で渋滞メッシュ同士が隣接する辺の数をジョイン数  $b$  として扱う。

観測された現象への判断基準として、各メッシュで渋

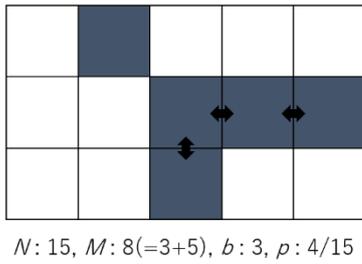


図-6 集塊性概念図

滞メッシュが生起するという事象が独立であるという意味での「ランダム状態」におけるジョイン数の期待値  $E$  , 分散  $V$  を用いる. この時, 期待値  $E$  , 分散  $V$  は以下の式(5), (6) で得られる.

$$E = (2N - M)p^2 \quad (5)$$

$$V = (2N - M)p^2 + 4(3N - 3M + 2)p^3 - (14N - 13M + 8)p^4 \quad (6)$$

ここで,  $N$  は全メッシュ数,  $M$  はメッシュの縦横の長さの和,  $p$  は渋滞メッシュの発生確率である. 本研究では, 確率  $p$  として各日の全体メッシュのうち, 渋滞メッシュ数の比率 (構成比) を利用する.

その後, 観測された実際のジョイン数  $b$  の期待値  $E$  からの乖離を示す指標としてクラス値  $c$  を算出する.

$$c = \frac{b - E}{\sqrt{V}} \quad (7)$$

構成比のみでは, 混雑する領域の比率しか判断できないのに対して, クラス値を用いることにより, 集中度の定量的表現が可能になる. 構成比, クラス値の2つの指標の変化を日単位で分析し, 混雑空間の増減と拡散・収束を把握する.

b) 結果

図-7に3種類のメッシュサイズにおける渋滞メッシュの構成比, クラス値の変化を示す. グラフ中の初日(11/6)が車線規制開始日, 縦の点線(11/20)が通行止め開始日を示す. 3次メッシュを基準とした場合, 渋滞の構成比は週末に低くなる(平均0.049)周期性を示し, 平日においても日々変動している. 車線規制時の平日構成比は平均が0.119となり, 通行止め時の0.204に比べ低いことが確認できる.

通行止め以降に注目すると, 構成比は開始後, 日々増加し, 次の週では日により変動している. クラス値は構成比とは異なる変化の傾向を示し, 4, 5次メッシュでは通行止め開始日に最大値を示した後, 低下する. 次の週には日による変動が少ない. 通行止め開始日には, 渋滞メッシュが工事区間周辺を中心に発生したため, 構成比は低く, クラス値は高くなる. その後, 遠い迂回を選択する利用者が増加したため, 渋滞メッシュは工事区間周

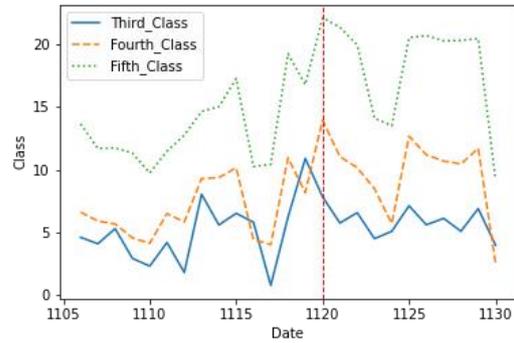
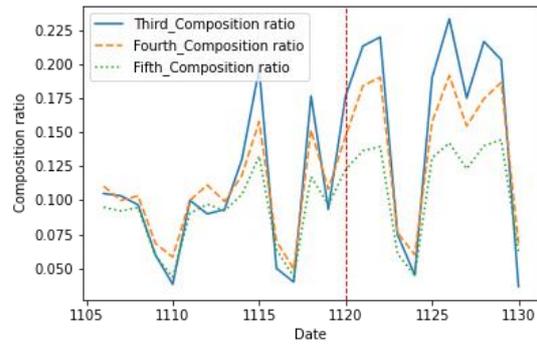


図-7 集塊性指標の変化 (上:構成比, 下:クラス値)

辺で低下し, 他の道路に分散, かつ増加した. そのため, 構成比は増加するが, クラス値は低下する傾向を示す. その次の週では, 構成比は変動するのに対しクラス値の変動は少ない. これは, 日によって渋滞メッシュが集中的に発生した位置が変化した結果だと推測される.

(3) 中心性指標に基づく影響評価

a) 分析方法

混雑を離散的に把握した集塊性指標は, 混雑の拡散・収束の定量的算出は可能であるが, 渋滞メッシュであるかそうでないかのみの判断になるため, 渋滞メッシュにおける混雑の程度が考慮されないという短所がある. しかし, 現実の混雑は程度の差や空間同士の相関を持つ. 混雑は道路ネットワークに沿って伝播されるため, 最も混雑する場所の周りに程度の小さい混雑状態の場所が位置する様子は簡単に想像できるものの, 集塊性指標では, 閾値を超えたメッシュはすべて同質と判断され, そのような関係が損失される.

このような問題点を踏まえ, 中心性指標の算出方式を用いて隣接するメッシュ間の関係に着目した分析を行う. 各メッシュをノード, メッシュの隣接関係をリンクとし, メッシュ空間をグラフとして扱うことで, ネットワーク表現による中心性指標の適用が可能になる. 対象メッシュを  $m$  とした場合, 中心性指標  $C$  は式(8)で求められる<sup>9)</sup>.

$$C_m(T, d) = a_m(T, d) \times s_m(T, d) \quad (8)$$

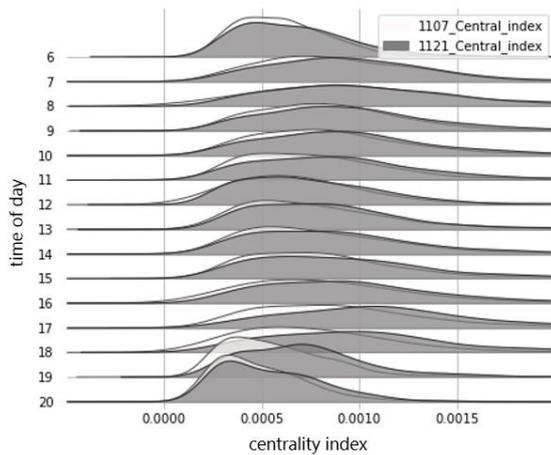


図-8 中心性指標分布の比較

$a_m(T, d)$  は対象メッシュ  $m$  における日付  $d$ ，時間帯  $T$  の平均速度の逆数， $s_m(T, d)$  は周囲の隣接する8個のメッシュ平均速度の合計の逆数である。

まず，連続値である速度を用いることで，混雑の程度が考慮される。さらに，対象メッシュの値と周辺のメッシュの値の掛け算で，隣接するメッシュとの関係性を表すことができる。対象メッシュと周辺メッシュがどちらも混雑している場合は1に近い値が得られ，対象メッシュは混雑しているが周辺メッシュの多くは混雑していない場合は0に近い値が得られる。そのため，混雑メッシュが集中している場所に比べて，独立に発生した混雑は指標が小さくなる特徴を持つ。この特性を持つ中心性指標  $C_m$  の分布に着目し，日々による変化の把握，同じ日の別時間帯の混雑の拡散・収束を把握する。

#### b) 結果

中心性指標に基づく結果の例として，3次メッシュの11月7日（車線規制時）と21日（通行止め時）の分布を図-8に示す。縦軸が時間，横軸が中心性指標を示す。交通量の増加する7時から分布は右に偏り，昼時間帯では安定した様子を示した後，17～20時にまた右に偏る傾向が確認できた。工事区間周辺を中心に混雑が発生した車線規制時より，通行止め時には分布が右に偏っていることが確認できる。図-8の中には示していないが，車両移動の少ない深夜時間帯で移動が円滑であるため，分布が0に近いことがわかった。

このように，メッシュ速度のヒストグラムでは確認できない混雑の集合度を，中心性指標の分布傾向によって比較できることが確認できた。また，中心性指標の高いメッシュの位置変化を通じて，混雑の中心になる地域を数値的に表現することも可能である。本研究で用いるデータが商用車プローブデータという特性上，海岸地域（物流センターや工場）に上位のメッシュが集中するという特性を持つ。

## 4. 結論と今後の課題

本研究を通じて，得られた成果を以下に示す。

- ・メッシュ集計を利用しマップマッチング処理を必要とせず，車両軌跡データを用いた車線規制と通行止めの影響の空間的把握をおこなうことができた。
- ・集塊性指標の変動を通じ，集中工事期間中での混雑の拡散・収束を定量的に表すことができた。工事期間中の渋滞発生位置の変動を確認し，新たな均衡状態に至らなかったことわかった。
- ・メッシュ空間をグラフとして扱い中心性指標を活用することで，渋滞メッシュが隣接しているかどうかを考慮し，混雑の集中度を表現することができた。

今後の主な課題は以下の通りである。

- ・本研究では異なる特性を持つメッシュを単一の閾値で，渋滞か否かを判断している。そのため，メッシュ空間での渋滞の基準を理論的に定義することが必要である。
- ・本研究は実例工事に基づく事後分析であるが，今後このようなデータを用いて混雑発生位置の予測モデルを構築し再現性の確認をすることで，他の工事の事前対策に適用できるようにする。

**謝辞：**本研究を遂行するにあたって，商用車プローブデータをご提供いただいた富士通交通・道路データサービスに対し，感謝の意を表します。また，本研究の一部は科学研究費（基盤研究A: 17H01297）の助成により行われています。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) Shanjang Zhu, David Levinson, Henry X.Liu, Kathleen Harder: 'The traffic and behavioral effects of the I-35W Mississippi River bridge collapse', *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(10), pp. 771–784, 2010.
- 2) 藤田素弘, 雲林院康宏, 杉浦 裕幸, 野田 宏治: 都市高速道路の集中工事に伴う道路ネットワークの交通状況と評価に関する研究, *土木計画学研究・論文集*, 21(4), pp. 933-940, 2004.
- 3) 井上徹, 兒玉崇: 商用車の経路データ等を活用した大規模補修工事の交通影響分析について, *近畿地方整備局研究発表会, 新技術・新工法部門(02)*, pp. 1-6, 2014.
- 4) 安藤宏恵, Lee, I., 朝倉康夫, 中西航: 商用車プローブデータによる車線規制・通行止めが及ぼす影響分析, *IIS シンポジウム*, 18, 2020.
- 5) 嶋本寛, 八尋久志: プローブカーデータを用いたリンク途絶が交通ネットワークに及ぼす影響の経時的分析, *土木計画学研究発表会・講演集*, 53, pp. 1213-1218, 2016.
- 6) 福田大輔, 水口正教, 瀬尾亨, 日下部貴彦, 朝倉康夫: 広域・長期観測プローブ情報を用いたエリアレベルでの旅行時間信頼性評価, *土木学会論文集 D3*, 73(5), pp. 1105–1118, 2017.

- 7) 貞広幸雄, 山田育穂, 石井儀光 : 空間解析入門 —都市を測る・都市がわかる—, 朝倉書店, 2018. distribution centre location in the supply chain management, Proceedings of 2014 Science and Information Conference, SAI 2014, pp. 100–111, 2014
- 8) 玉川英則: 土地利用の秩序性の数理的表現に関する考察, 都市計画論文集, 都市計画論文集, 17, pp. 73-78, 1982. (2021. 03. 07 受付)
- 9) Akanmu, A. A. G., Wang, F. Z., and Yamoah, F. A. : Clique structure and node-weighted centrality measures to predict

## DIFFUSION/CONVERGENCE ANALYSIS OF CONGESTION DUE TO ROAD CLOSURES USING VEHICLE TRAJECTORY DATA

Inho LEE, Hiroe ANDO, Wataru NAKANISHI, and Yasuo ASAKURA

Currently, Japan is facing the aging of its social infrastructure, and repair works are frequently carried out also on expressways with heavy traffic. In particular, large-scale renewal projects, carried out as intensive constructions, accompany lane restrictions and road closures. As result, they have a significant impact on the surrounding areas. However, there are only few studies on the effects of intensive constructions. In this study, in order to analyze the impact of the Hanshin Expressway Wangan-sen renewal project, we aggregated the probe data on mesh basis to compare the changes in traffic conditions before and under the construction. In addition, the diffusion and convergence of congestion were quantitatively expressed by applying the agglomeration index and the centrality index. As a result, it was clarified that the road closure construction had a greater impact on the surrounding area than the lane restriction construction and that a new equilibrium state could not be reached during the construction period.