

センシングデータ融合による東北自動車道の大規模更新時の交通インパクト評価

川崎洋輔^{*1} 岩城一郎^{*1} 石橋寛樹^{*1} 小島卓也^{*2}

日本大学工学部^{*1}

東日本高速道路株式会社^{*2}

本研究は、センシングデータを用いて、高速道路の大規模更新時の交通流へのインパクトを分析する。高度経済成長期に建設され、長期間が経過した高速道路の大規模更新が全国で行われ始めている。高速道路の大規模更新は、工事が長期間に及ぶため、交通規制による渋滞が利用者へ与える影響が大きい。渋滞緩和のための適切な交通対策を実施するためには、まず、工事時の交通状態を長期的にモニタリングする必要がある。よって、本研究では、プローブデータ等のセンシングデータを用いて、大規模更新時の渋滞発生状況を定量的に分析した。

Evaluation of Traffic Impacts During Large-scale Renewal of the Tohoku Expressway Through Fusion of Sensing Data

Yosuke Kawasaki^{*1} Ichiro Iwaki^{*1} Hiroki Ishibashi^{*1} Takuya Kojima^{*2}

College of Engineering, Nihon University^{*1}

East Nippon Expressway Company Limited^{*2}

This study analyzes the impact of large-scale renovations on traffic flow on expressways using sensing data. Large-scale renovations of expressways constructed during the period of high economic growth and now in use for an extended period are beginning nationwide. Due to the prolonged duration of construction, large-scale renovations of expressways can cause significant traffic congestion and disruptions for users. To implement appropriate traffic measures to alleviate congestion, it is necessary to first monitor traffic conditions during construction over the long term. Therefore, this study quantitatively analyzed traffic congestion patterns during large-scale renovations using sensing data such as probe data.

Keyword: probe data, large-scale highway renewal, traffic congestion, traffic monitoring, traffic restriction

1. はじめに

1.1 現状と課題

本研究では、センシングデータを用いて、2025年に実施された東北自動車道のリニューアル工事の交通インパクトを分析する。

高度経済成長期に建設され、過酷な環境下で劣化した高速道路の大規模更新事業が全国で行われ始めている。

しかし、現状は、高速道路ネットワークの大規模更新計画を立案するにあたって、以下の深刻な問題を抱えている。適切な大規模更新のためには、直接工事費のみならず、維持管理費を含めたLCC(Life Cycle Cost)

を考慮すべきだが、その評価方法が確立されていない。また、工事中の長期的な規制時におけるネットワーク交通流への影響が不明である。

よって、本研究では、車両感知器やプローブデータ等のセンシングデータを用いて、東北自動車道の大規模更新（床版取替）時の渋滞状況を定量的に分析する。

1.2 既往研究

わが国の工事区間の交通容量に関する文献は、“道路維持修繕要綱(1978)¹⁾”，“路上工事の交通運用資料(1997)²⁾”等にしか整理されておらず、これらは、発行から長い年数が経過している。そのため、車両性能や

交通管制技術の発展した現在においては、交通規制時の交通容量の分析に、既往文献^{1,2)}の知見をそのまま適用することは困難な状況となっている。一方、国外においては、例えば、わが国の道路構造令にあたる米国の“Highway Capacity Manual (TRB, 2022)³⁾”が有名であるが、交通規制時の交通運用 (e.g., 工事規制区間の交通容量) に関する記載はない。

次に、工事規制時の交通容量を分析した研究を以下に述べる。Weng and Meng(2013)⁴⁾は、工事区間における交通容量と交通遅延の推定に関する研究をレビューしている。まず、工事区間の容量に影響を与える要因を整理するとともに、交通状態（容量や遅れ時間）を推定するためのパラメトリック、ノンパラメトリック、シミュレーションの3つのアプローチをレビューしている。これらのアプローチの研究はいくつか存在する (Jian et al. (2013)⁵⁾, 山本ら (2022)^{6,7)}, 高瀬ら (2025)⁸⁾)。

既往研究のまとめを以下に整理する。工事規制区間の交通容量を規定した要領は古いものしか存在しない。交通容量の観測は、主に車両感知器およびビデオカメラで調査している。工事区間の渋滞状況はプローブデータにより解析している研究がいくつか存在する。しかしながら、床版取替工事のように長期間に及ぶ交通規制時の交通モニタリングを行った研究は少ない。また、工事規制区間の交通容量や渋滞状況を解析している研究は存在するものの、その事例は少なく、知見が十分であるとは言い難い。

1.3 本研究の貢献

既往研究を踏まえて、本研究の貢献を以下に示す。

- 1) 工事渋滞の定量的な分析方法として、車両感知器やプローブデータを用いた渋滞影響度及び交通流率の推定方法を提案した。
- 2) 長期間の工事時の交通モニタリングにより、ゴールデンウィークよりも工事時の渋滞影響度が大きい傾向にあることがわかった。
- 3) 工事区間の渋滞時（17 – 20 時）の交通流率は、1,500[pcu/hr/車線] 程度であることが確認された。

2. 分析方法

ここでは、交通流の分析方法を述べる。本研究では、タイムスペース図等のデータ可視化に加えて、渋滞状況を定量的に評価するための渋滞影響度および工事区間の交通流率の推定方法を提案する。渋滞影響度と交通流率の推定方法を以下に定義する。

2.1 渋滞影響度

本節では、プローブ車両軌跡データを用いた渋滞影響度 (hr · km) を定義する。本研究では、区間ごとのプローブ車両の速度低下に基づき、渋滞影響度を推定する方法を提案する。この方法は、道路を微小な区間（リンク）に分割し、各車両がそのリンクを通過する際に経験した時間損失を積算することで、精緻に渋滞影響度を推定することを試みる。渋滞影響度の算定方法を以下に述べる。

道路の区間分割

道路ネットワークを、微小な区間（リンク）に分割する。各リンク $L_i, i = 1, 2, \dots, I$ は、始点 $P_{i,start}$ と終点 $P_{i,end}$ によって定義され、その区間長を d_i と定義する。

自由流速度の定義

各リンク L_i における自由流速度 $V_{f,i}$ を定義する。これは渋滞がない理想的な条件下での車両の走行速度であり、道路の設計速度、あるいは交通量が極めて少ない時間帯の平均速度などを用いて設定する。

各車両の区間通過時間の算出

車両 k の軌跡データは、時刻 t_j における位置 (lat_j, lon_j) と速度 v_j の系列 $T_k = \{(t_j, lat_j, lon_j, v_j)\}_{j=1}^{N_k}$ として与えられる。車両 k がリンク L_i を通過する際の実際の通過時間 $\Delta t_{k,i}^{actual}$ を算出する。これは、車両 k がリンク L_i の始点 $P_{i,start}$ を通過した時刻 $t_{k,i}^{start}$ と終点 $P_{i,end}$ を通過した時刻 $t_{k,i}^{end}$ の差として下式で定義される。

$$\Delta t_{k,i}^{actual} = t_{k,i}^{end} - t_{k,i}^{start} \quad (1)$$

車両軌跡データの処理方法（線形補間）

プローブデータは連続的な位置情報として得られるため、車両が正確にリンクの始点・終点を通過した時刻を直接取得できるとは限らない。この場合、線形補間を用いて通過時刻を推定する。車両 k の連続するデータ点 (t_j, lat_j, lon_j) と $(t_{j+1}, lat_{j+1}, lon_{j+1})$ の間にリンクの始点または終点が存在する場合、その通過時刻 t_{pass} は以下の式で推定できる。

$$t_{pass} = t_j + (t_{j+1} - t_j) \times \frac{D(P_j, P_{pass})}{D(P_j, P_{j+1})} \quad (2)$$

ここで、 $P_j = (lat_j, lon_j)$, $P_{j+1} = (lat_{j+1}, lon_{j+1})$, P_{pass} は通過点（リンクの始点または終点）、 $D(A, B)$ は点 A と点 B 間の距離を表す。

リンクごとの基準通過時間の算出

車両 k がリンク L_i を自由流速度 $V_{f,i}$ で走行した場合にかかる基準通過時間 $\Delta t_{k,i}^{free-flow}$ は、リンク長 d_i を自由流速度で割ることで求められる。

$$\Delta t_{k,i}^{free-flow} = \frac{d_i}{V_{f,i}} \quad (3)$$

各車両のリンクにおける時間損失の算出

車両 k がリンク L_i において経験した時間損失 $\Delta t_{k,i}^{loss}$ は、実際の通過時間と基準通過時間の差として定義される。車両が自由流速度よりも速く走行した場合、時間損失はゼロと見なす。以上を踏まえた時間損失を下式で定義する。

$$\Delta t_{k,i}^{loss} = \max(0, \Delta t_{k,i}^{actual} - \Delta t_{k,i}^{free-flow}) \quad (4)$$

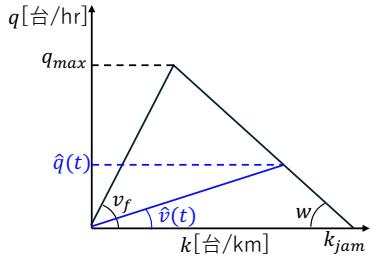


Fig.1: 交通流率の推定

渋滞影響度 (hr · km) の推定

渋滞影響度 C は、すべての車両のすべてのリンクにおける時間損失に、そのリンクの長さを乗じ、積算することで算出される。これは、交通システム全体における「渋滞による余分な走行時間」とその時間中の「走行距離」の積和を表す。渋滞影響度を下式で定義する。

$$C = \sum_{k \in \text{全車両}} \sum_{i \in \text{全リンク}} (\Delta t_{k,i}^{\text{loss}} \times d_i) \quad (5)$$

上式の C が渋滞影響度である。渋滞影響度の単位は $\text{hr} \cdot \text{km}$ のように時間と距離の積となる。

2.2 工事区間の交通流率

工事区間の交通流率の推定方法を述べる。工事区間に車両感知器があれば、交通流率を観測可能である。しかし、東北地方の東北自動車道において、車両感知器設置数は、IC間に1箇所程度となっており、工事区間に車両感知器が存在しない場合がある。そこで、本研究では、あらかじめ車両感知器により推定された FD (交通流率-密度関係) を用いて、逐次、観測されるプローブ車両速度を用いた飽和交通流率の推定方法を提案する。

まず、車両感知器データを用いて、図-1に示す区分線形 FD が推定する。図の横軸は交通密度、縦軸は交通流率である。 v_f は自由流時速度 (フォワードウェーブ速度)、 w はバックワードウェーブ速度、 q_{\max} は最大交通流率、 k_{jam} はジャム密度である。時刻 t にプローブ車両速度 $\hat{v}(t)$ が観測されたと考えよう。この時、交通流率は、図-1に示す $\hat{q}(t)$ として推定する。 $\hat{q}(t)$ の算定式を以下に定義する。

$$\hat{q}(t) = \begin{cases} \text{if } \hat{v}(t) > v_f, q_{\max} \\ \text{else } \hat{v}(t) \cdot (w \cdot k_{\text{jam}}) / (\hat{v}(t) + w) \end{cases} \quad (6)$$

式(6)のようにプローブ速度 $\hat{v}(t)$ が自由流速度 v_f を超える場合は、便宜的に q_{\max} を交通流率の推定値とした。 k_{jam} は、車両感知器での観測が難しいため、 $k_{\text{jam}} = q_{\max}/v_f + q_{\max}/w$ で推定する。本手法であれば、プローブ速度が得られる度に、時系列的に交通流率の推定が可能である。しかしながら、推定される交通流率は、区分線形 FD の推定誤差やプローブ速度の観測誤差が含まれる。そこで、本研究では、線形ガウス状態空間モ

Table 1: リニューアル工事 (東北自動車道) ^{注) 10)}

番号	区間	期間
I	白石 IC ~ 村田 IC	5/12 ~ 7/17
J	国見 IC ~ 白石 IC	5/23 ~ 8/6
K	二本松 IC ~ 福島西 IC	3/3 ~ 7/2
L	本宮 IC ~ 二本松 IC	6/16 ~ 12/19
M	矢吹 IC ~ 郡山南 IC	5/7 ~ 6/21
N	那須 IC ~ 白河 IC	5/7 ~ 8/8

注) 区間 A~H は本研究の対象外のため未掲載



Fig.2: 工事区間 (区間 A~H は本研究の対象外)¹⁰⁾

デルにより、フィルタリング値を推定することとする。ここで、線形ガウス状態空間モデルとは、観測値と状態変数が正規分布 (ガウス分布) に従い、両者の関係が線形であると仮定した状態空間モデルで、カルマンフィルタにより、誤差のない「真の状態」を推定するために用いられる。状態空間モデルは、状態方程式と観測方程式で構成され、ノイズが正規分布に従うと仮定する。状態空間モデルの詳細は参考文献⁹⁾を参照されたい。状態空間モデルを以下に定義する。

$$x(t) = x(t-1) + \epsilon_{\text{sys}}, \epsilon_{\text{sys}} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{\text{sys}}^2) \quad (7)$$

$$\hat{q}(t) = x(t) + \epsilon_{\text{ob}}, \epsilon_{\text{ob}} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{\text{ob}}^2) \quad (8)$$

ここで、 $x(t)$ は、時刻 t の状態変数であり、推定する交通流率を表す。式(7)が状態方程式であり、ランダムウォークを仮定する。式(8)は観測方程式である。

3. 分析結果

本節では、工事時の交通流の分析結果について述べる。

3.1 分析の条件

まず、本研究が対象とする東北自動車道の工事一覧 (表-1) 及び区間 (図-2) を示す。表に示すように、東北自動車道では、複数の区間の床版取替工事が実施されている。最も工事開始時期が早いのは、「二本松 IC

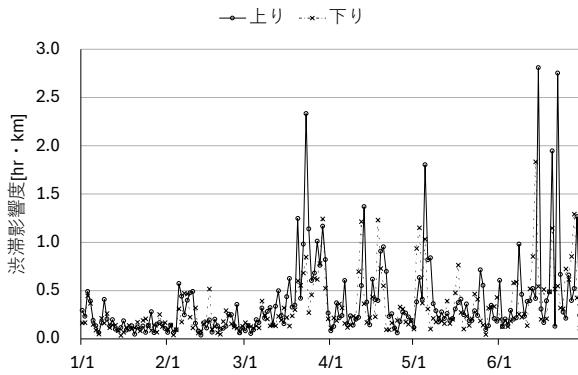


Fig.3: 滞滞影響度の時系列変化 (2025年1月-06月)

～福島西 IC」区間であり、工事期間は4ヶ月程度となっている。区間(図-2)を見ると、工事区間に隣接している箇所はないことがわかる。なお、工事時の規制方法は、「本宮 IC～二本松 IC¹」を除き、車線規制(片側2車線から1車線に車線減少)が実施され、滯滞の発生が予測されている。本研究では、NEXCO 東日本により事前に工事時の滯滞を予測している以下の区間及び工事前後の期間を分析対象とした。

区間 東北自動車道 那須 IC～菅生 PA

期間 2025年1月1日～6月30日(6ヶ月間)

3.2 滞滞発生状況

東北自動車道の方向別・日別の滯滞影響度の変化を分析する。図3に日別・方向別の滯滞影響度の時系列変化を示す。なお、滯滞影響度を推定するためのリンク $L_i, i = 1, 2, \dots, I$ のリンク長及び自由流速度は $v_{f,i} = 80[\text{km}/\text{h}], L_i = 100[\text{m}], \forall i$ とした。上り方向では、3月末ごろやゴールデンウィーク期間(4/25～5/6)及び6月中旬から下旬に滯滞影響度が大きいことがわかる。下り方向を見ると、上り方向と同様に、3月末頃、ゴールデンウィーク期間や6月後半の滯滞影響度が大きい傾向が見られる。6月に滯滞影響度が大きい理由は、行楽シーズンによる交通需要の増加が一因と推察される。なお、ゴールデンウィーク期間は、休工期間となっており、工事による滯滞影響はない。以上より、当該区間では、上下方向ともに、ゴールデンウィークよりも工事による滯滞影響度の方が大きいことが確認された。

次に、滯滞影響度の大きい日の滯滞発生状況を分析する。図4、図5に、東北自動車道の上下方向の滯滞影響度ワースト1位と5月5日(ゴールデンウィーク)のETC2.0プロープデータによるタイムスペース図を示す。30分×500mの時空間メッシュの空間平均速度を可視化している。まず、上り方向の滯滞影響度ワースト1位(図4a)に着目すると、二本松 IC を先頭とした滯滞が12時頃から夜の22時頃まで続いている。滯滞は、

二本松 IC 付近を先頭とし、滯滞末尾は、福島松川 PA を超えて、10km 程度延伸している。一方で、5月5日の滯滞(図4b)に着目すると、14時ごろから福島松川 PA 付近を先頭とした滯滞が、吾妻 PA 付近まで5km 程度、延伸している。以上より、工事により、上り方向では、通常とは異なるボトルネックの滯滞が発生したことが確認された。一方、下り方向の滯滞影響度ワースト1位(図5a)に着目すると、8時から14時頃にかけて、二本松 IC 付近を先頭とした滯滞が安達太良 SA 下流まで延伸している。最大滯滞長は5～7km 程度と考えられる。一方で、5月5日の滯滞(図5b)に着目すると、夕方の16時頃から福島松川 PA 下流付近で滯滞が発生している。上り方向と同様に工事期間中とゴールデンウィークは異なるボトルネックの滯滞が発生している。

工事区間の交通容量把握のために、滯滞ボトルネックである福島松川 PA 付近の車両感知器によるQ-Vプロットを分析する。Q-Vプロットを図6に示す。上り方向(図6a)を見ると、工事前は、主に自由流領域(速度が60km/h以上の領域)にデータが見られるが、工事中は、滯滞領域(速度が40km/h以下)にデータが出現している。工事期間中のデータ形状がハの字を右に90度傾けた形状になっており、臨界流(最大捌けが出現する速度が60km/h程度の領域)が見られないことから、滯滞ボトルネック(工事区間)は、感知器よりも下流側に位置していると推察される。下り方向(図6b)を見ると、上り方向と同様に、工事中のデータが臨界流の領域にプロットされていないことから、滯滞ボトルネックと感知器の設置位置が異なると考えられる。以上を踏まえ、次節では、感知器データとプロープデータを融合解析し、工事区間の交通流率(滯滞時の工事区間の容量)の推定結果を述べる。

3.3 工事区間の交通流率の推定結果

本節では、工事滯滞の最も激しい東北自動車道上り方向の2025年6月15日(日)の二本松 IC～福島西 IC間(245KP付近)の交通流率の推定結果を述べる。

まず、車両感知器による区分線形FDの推定結果を述べる。図7に推定した区分線形FDを示す。データは、滯滞が発生し、かつ、休工期間であるゴールデンウィークの5月1～6日とした。FDのデータプロットは、最大捌け台数が出現する臨海密度で、自由流と滯滞流を判別し、色分けしてデータをプロットしている。あわせて、線形回帰により、自由流と滯滞流のデータの線形近似直線を可視化している。この図より、区分線形FDのパラメータを以下のように設定した。

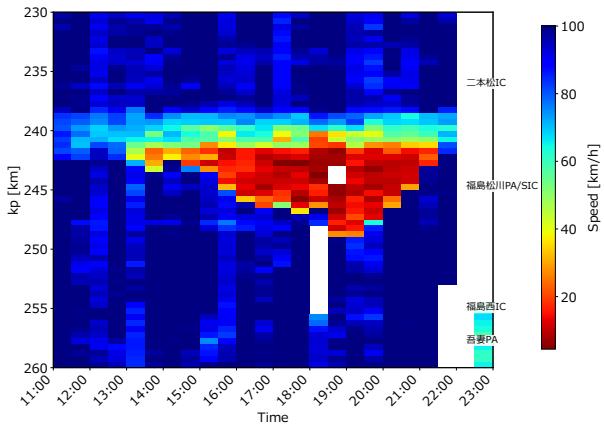
$$v_f = 80[\text{km}/\text{h}]$$

$$w = -18[\text{km}/\text{h}]$$

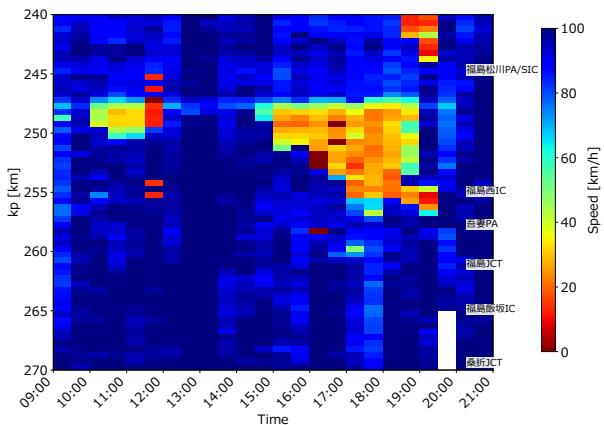
$$q_{\max} = 3,012[\text{pcu}/\text{hr}]$$

次に、交通流率の推定結果を述べる。交通流率の推定時間は、需要集中による工事区間の滯滞が発生し、容量

¹本宮 IC～二本松 IC(安達太良 SA 付近)は車線シフト規制により、工事期間中も片側2車線を確保している¹⁰⁾。



(a) 2025年06月15日(日)渋滞影響度ワースト1位



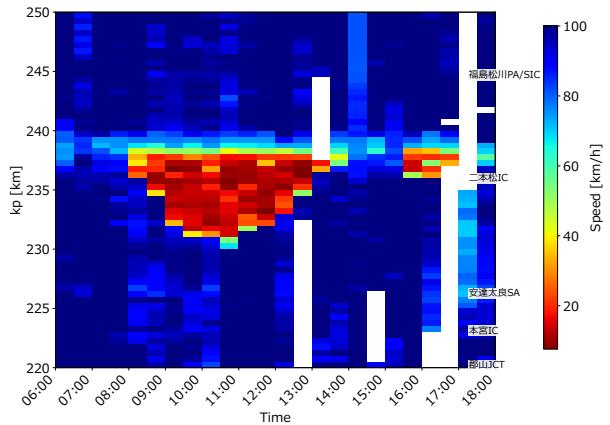
(b) 2025年05月5日(月)ゴールデンウィーク(休工期間)

Fig.4: タイムスペース図：東北自動車道[上り方向]

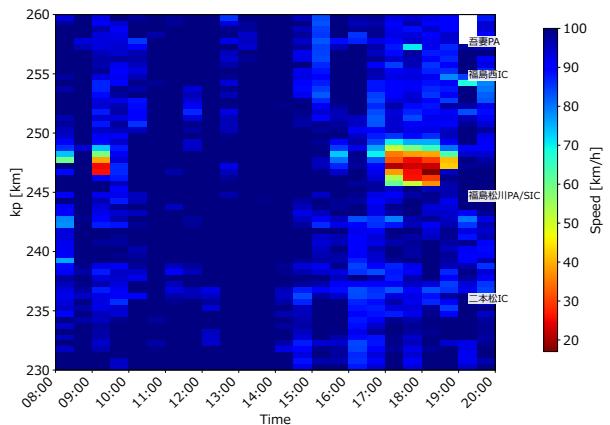
が出現すると思われる 17~20 時とした。前述の FD を用いて、東北自動車道上り方向の工事区間(245KP 付近)の渋滞中の交通流率を推定した結果を図 8 に示す。図の横軸は時刻であり、縦軸は交通流率である。式(6)による推定値を青色の点でプロットし、フィルタリング値をオレンジの線で可視化している。なお、カルマンフィルタのパラメータは、便宜上、 $x(0) = q_{max}$, $\sigma_{sys}^2 = \sigma_{ob}^2 = 100$ とした。図を見ると、交通流率の推定値は、同じ時間帯であっても車両ごとに大きく変動している。一方、フィルタリング値は、値が補正されている状況が確認される。17~20 時のフィルタリング値の平均交通流率は、1,537[pcu/hr] であった。参考文献¹¹⁾によると、都市間高速道路の片側 2 車線区間の容量を 1 車線換算すると、1,165~1,780[台/時] となる。よって、推定された工事区間の交通流率は、この容量値と同程度（範囲内）を担保していると解釈される。

4. おわりに

本研究では、センシングデータを用いて、東北自動車道のリニューアル工事時の渋滞状況を分析した。その結果、工事期間中は、ゴールデンウィークよりも激



(a) 2025年06月14日(土)渋滞影響度ワースト1位



(b) 2025年05月5日(月)ゴールデンウィーク(休工期間)

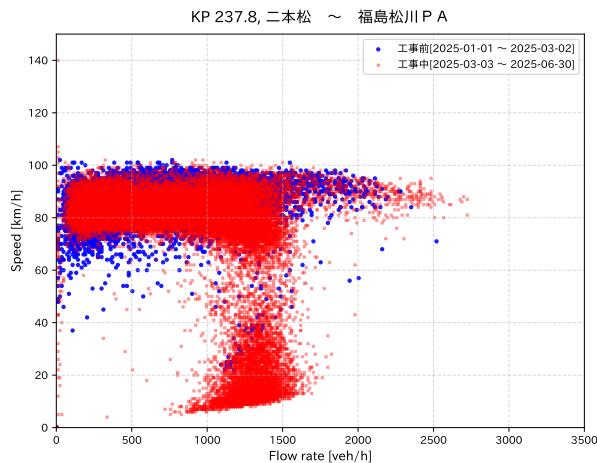
Fig.5: タイムスペース図：東北自動車道[下り方向]

しい渋滞が発生していたこと、工事区間の渋滞時の交通流率（飽和交通流率）は、1,500[pcu/hr/車線] 程度であることがわかった。

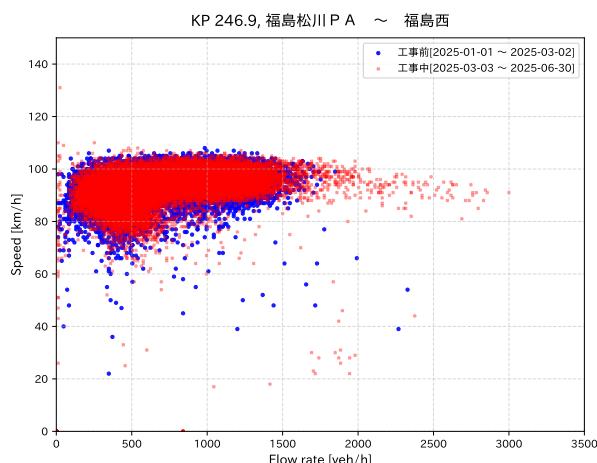
今後の研究課題を以下に整理する。

- 1) 広域的な交通流の解析：本研究では、東北自動車道に着目した工事時の交通解析を行なった。ネットワーク交通流への影響を捉えるためには、他の高速道路網（e.g., 常磐自動車道）や一般道などを含めた広域ネットワークの交通流を解析する必要がある。
- 2) 人流データによる経路選択行動の分析：東北自動車道が渋滞の場合、ドライバーは他の経路（e.g., 一般道、常磐自動車道）に迂回することが考えられる。今後は、人流データ²を活用した迂回等の経路選択行動を分析し、渋滞との関連性を把握する必要がある。
- 3) 広報による迂回誘導効果の把握：NEXCO 東日本では、東北自動車道の工事渋滞の回避のために、常磐自動車道への迂回の検討をテレビ CM や WEB 等で広報している。このような広報効果を定量的に把握

² 人流データとは、スマートフォンから得られる移動軌跡（GPS）である。ID の追跡により、日々の経路選択行動が把握できる。



(a) 上り方向：二本松-福島松川 PA, 237.8KP



(b) 下り方向：福島松川 PA-福島西, 245.9KP

Fig.6: 工事区間付近の工事前後の Q-V プロット

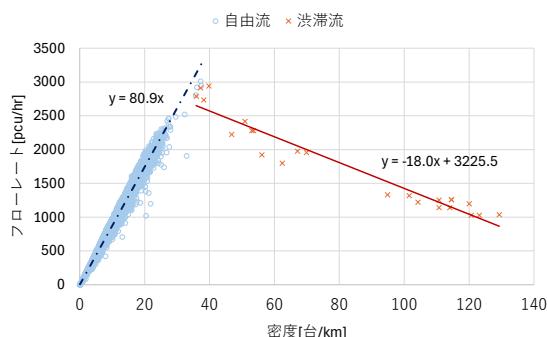


Fig.7: 区分線形 FD(期間：2025 年 5 月 1～6 日)

する必要がある。例えば、因果推論の枠組で、交通状態 (e.g., 淀滞状況,迂回率)と広報 (e.g., CM 放映回数)の関係を分析することが考えられる。

謝辞：本研究成果は、JSPS 科研費 25K079696, 東日本

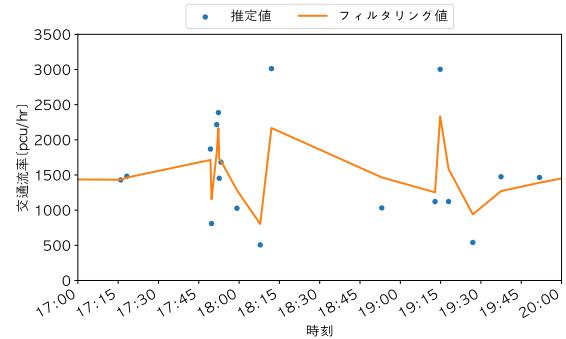


Fig.8: 交通流率の推定結果 (2025 年 6 月 15 日 (日))

高速道路株式会社「人流データを活用した高速道路の交通流分析共同研究」、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第3期「スマートインフラマネジメントシステムの構築」JPJ012187 (研究推進法人: 土木研究所)、日本大学「R7年度若手研究助成金」により得られたものです。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 道路維持修繕要綱 改訂版. 公益社団法人 日本道路協会, 1978.
- 2) 路上工事の交通運用検討資料. 一般社団法人 交通工学研究会, 1997.
- 3) Highway Capacity Manual (HCM) . Transportation Research Board (TRB) , 2022.
- 4) J. Weng and Q. Meng. Estimating capacity and traffic delay in work zones: An overview. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 35:34–45, 2013.
- 5) Z. Jian, L. Qingxia, Z. Liande, X. Jun, and Z. Ronggui. Model of work zone capacity of reconstructed expressway. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 96:210–217, 2013. Intelligent and Integrated Sustainable Multimodal Transportation Systems Proceedings from the 13th COTA International Conference of Transportation Professionals (CICTP2013).
- 6) 山本隆, 上水一路, 花田大輝, 鶴元史, 中林悠, 下川澄雄. 都市間高速道路における対面通行規制時の交通容量に関する基礎分析. 交通工学研究発表会論文集, 42:427–434, 2022.
- 7) 山本隆, 上水一路, 花田大輝, 鶴元史, 中林悠, 下川澄雄. 都市間高速道路における対面通行規制時の交通容量変動要因分析. 土木学会論文集, 79(20):23–20015, 2023.
- 8) 高瀬達夫, 角田尚寛, 柴田直弥, 野中康弘, 石田貴志, 中林悠. 山間部における片側交互通行規制時の飽和交通流率分析. 交通工学論文集, 11(2):B 17–B 23, 2025.
- 9) 北川源四郎. R による時系列モデリング入門, 岩波書店, 2023.
- 10) NEXCO 東日本. 東北自動車道のリニューアル工事のお知らせ, URL:<https://www.e-nexco.co.jp/pressroom/tohoku/2025/0407/00014855.html>, (2025 年 10 月 8 日アクセス)
- 11) 一般社団法人 交通工学研究会. 道路の交通容量とサービスの質に関する研究, 令和 3 年～令和 5 年度 基幹研究課題 成果報告書, 2024.