高速道路リニューアル工事の影響による MFD 形状変化分析

中村　俊之[1]・桑原　昌広[1]

[1]正会員　トヨタ自動車株式会社（〒100-0004 東京都千代田区大手町 1-6-1）
E-mail: toshiyuki.nakamura@toyota-tokyo.tech, kuwahara@toyota-tokyo.tech

開通から 50 年度以上が経過している高速道路は老朽化が加速し，将来に渡って安全・安心・快適に高速道路の利用するためには，大規模リニューアル工事が必要である．高速道路管理者では，交通規制に伴う社会的な影響をできる限り軽減するための様々な対策や周知等を行い，その影響が最小限となるように工夫している．通行規制時における周辺道路への影響把握にも努めており，今後実施される交通規制を伴う大規模な工事にその結果を反映し，計画を進めている段階である．

そうした中で本研究では，阪神高速道路において実施されたリニューアル工事を対象として，その工事が一般道路に与えた影響を一般車両のコネクティッドデータを用いた MFD 形状変化を分析する．通行止め前後において，MFD 形状には変化が確認され，交通規制を含むエリアにおける面的な影響度の把握を定量的に示した．

Key Words: *Connected car data, Macroscopic Fundamental Diagram*

1. 背景

我が国の高速道路の誕生から，約半世紀が過ぎ，老朽化が進んでいる．将来にわたって，安全・安心・快適な高速道を利用するために，現在では長期にわたり， 橋やトンネルなどを中心として，大規模なリニューアル工事が道路管理者において実施されている．東日本，中日本，西日本の高速道路 3 社では，延長 500km，事業費約 1 兆円の新たな更新計画をまとめている．首都高速道路では新たな更新事業（延長 22km）に，約 3,000 億円に及ぶ更新計画の概要を発表し，阪神高速道路でも新たに 2000 億を投じて老朽化したトンネルや高架橋などの延長 22km の区間を更新すると発表している．

リニューアル工事に伴い，交通流への影響が想定される中で，高速道路管理者では，交通規制に伴う社会的な影響をできる限り軽減するための様々な対策や周知等を行い，その影響が最小限となるように工夫している．通行規制時における周辺道路への影響把握にも努めており，今後も全国の高速道路で実施される交通規制を伴う大規模な工事にその結果を反映し，計画を進めている段階にある．

そうした中で，本研究では，阪神高速道路において実施されたリニューアル工事を対象として，その工事が一般道路に与えた影響を一般車両のコネクティッドデータを用いた Macroscopic Fundamental Diagram（以下，MFD と呼称）形状変化を分析を通じて，そのリニューアル工事による影響が動的な変化を把握することを目的とする．

大規模リニューアル工事の実施に伴い，交通ネットワーク全体における交通流状態を捉えることが求められるが，交通ネットワーク全体における交通流状態の把握に関しては過去から研究の対象であった [1), 2)]ものの，物理的な限界もあり経験的なデータで検証をすることは難しいとされていた中で，Daganzo[3)-5)]は都市内道路ネットワークの交通流状態を巨視的なレベルで交通流動量と交通密度の関係を捉える把握手法を提案した．MFD に交通ネットワークへの車両流入に制約を与え，混雑状況を回避し，ネットワーク全体での効率性の最大化を目指した研究 [6)]なども進められている．

研究での利用データに着目すると，王ら [7)]は一般道での渋滞を対象として，車両感知器により観測されたデータを用いることで MFD の特徴分析を行っている．理論的にはネットワーク内を移動するすべての車両の軌跡が既知である場合にはネットワーク全体での MFD を容易に分析できる一方で，現実的にすべての車両の軌跡を取得することは不可能であり，車両感知器ベースの MFD の算出にあたってはどの道路リンクに配置されているのかに依存することが指摘されている [8)]．一方で近年はプローブ車両の増加に伴い，ネットワーク内を移動する車両の少なくとも一部からの軌跡データを比較的容易に入手ができ，このデータを活用した MDF の推計を行う研究も存在する [9), 10)]．本研究においても，トヨタ自動車コネクテッドカーデータを用いて MFD の推計を行う．

2　対象とするリニューアル工事

本研究において対象は，阪神高速 3 号神戸線京橋～摩耶間における終日通行止めによるリニューアル工事[11]である．通行止め期間は 2023 年 5 月 19 日（金）午前 4 時から同年 6 月 7 日（水）午前 6 時の 19 日間である．終日通行止区間を示す道路ネットワーク図を下記に示す．



図-1　対象とするリニューアル工事（阪神高速 3 号神戸線）[11]

3　利用データ

(1)　本研究で用いるコネクティッドデータの特徴

本研究で用いるトヨタ自動車株式会社のコネクティッドカーデータは，車両内を流れる CAN（Controller Area Network）データと呼ばれる車両内の様々なセンサデータも含まれており，それらのデータは通信機搭載車両からサーバにアップロードされる．

これまで交通工学・交通計画の分野では様々な車両のプローブデータ（例：ETC2.0 や商用車やバスなどの走行履歴に関するデータ）が利活用されてきたが，そうしたデータと比較して，データ収集頻度は高く，例えば，速度，加速度では 100ms に一度データが計測され，データがサーバに蓄積されている．

本分析での対象車両は、現状トヨタ自動車が販売する一般車両（乗用車）に限られており，その混入率は都道府県により異なるものの，数%から十数%程度である．一方で，VIN（Vehicle Identification Number）を継続的に追うことができる（同一車両を継続して追うことができる）データことが大きな特徴である．本研究では、この乗用車のデータを用いて分析を行う．

(2)　分析対象期間

第 2 章で示したように対象とする阪神高速 3 号神戸線京橋～摩耶間における終日通行止めによるリニューアル工事期間に対して，本研究では表-1 に示す工事開始の前後 1 週間のデータを対象とする．

表-1　分析対象期間

工事開始前	2023 年 5 月 12 日から 18 日のうち，平日 5 日間
工事開始後	2023 年 5 月 19 日から 25 日のうち，平日 5 日間

(3)　分析対象ネットワーク

本研究ではリニューアル工事に伴う一般道路への影響を分析し，図-2 で示すエリアの範囲のうち，通子止区間（図-2 の青色の枠で囲まれた範囲）に存在するすべての一般道路リンクを対象に集計する．

なお，一般道のみを対象としている理由であるが，当該地域の高速道路管理者である阪神高速道路では，高速道路上に設置している車両感知器や CCTV 等により，高速道路上の交通状況を定常時，交通事故発生等に伴う異常時，また工事等の通行止め時において把握している一方で，管理外となる一般道路の交通状況の把握はデータ制約等からも困難であることから，コネクティッドカーデータを用いて把握を試みることとした．

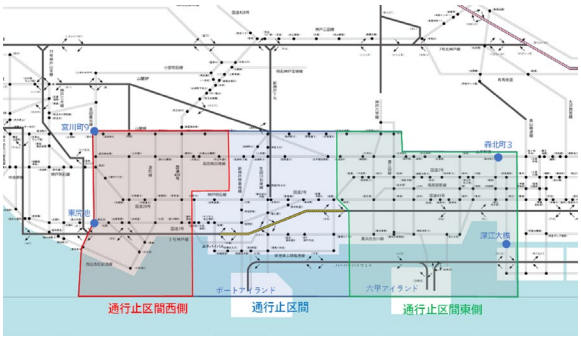


図-2　分析対象範囲

4.　本研究における交通流状態算定の方法

本研究における MFD の推計にはコネクテッドカーデータのみを用いて，交通流状態の記述を試みる．Edie[12]による一般化された定義ではネットワーク内のエリア密度 k とエリア流率 q は以下の式(1)と式(2)によって表現される．

$$k = \frac{\sum_1^I t_i}{L_n * T} = \frac{TTT}{L_n * T} \tag{1}$$

$$q = \frac{\sum_1^I d_i}{L_n * T} = \frac{TTD}{L_n * T}, \tag{2}$$

I　：単位時間当たりのトリップ数

t_i・d_i：分析単位の時間と距離

L_n：ネットワーク上の総距離

T　：分析単位の時間

TTT：分析時間内におけるネットワーク上を走行する

車両の旅行時間の総和

TTD：分析時間内におけるネットワーク上を走行する車両の走行距離の総和

ここでプローブ車両は全車両に対して，数%から数十%での混入率であり，上記式(1)と式(2)はネットワーク全体でのプローブ車両が分布しているという仮定に依存している．そこで，本研究では Nagle and Gayah により提案されたプローブの補正率を導入した式(3)と式(4)を用いて，MFD の推計を行う．式(3)と式(4)における ρ がプローブ混入率に関する補正係数となる．

$$\hat{k} = \frac{\sum_1^{l'} t_{i'}}{\rho L_n * T} \tag{3}$$

$$\hat{q} = \frac{\sum_1^{l'} d_{i'}}{\rho L_n * T} \tag{4}$$

なお，t にあたるコネクテッドカーデータの分析単位時間は 10 分間とし，ρ は車両感知器より収集した断面交通量に対して日別に算出して代入している．

ここで，コネクテッドカーデータによる時間的・空間的バイアスについては，吉井ら 10)が述べている通り，「時間的なバイアスに関しては，大量の時間帯についてデータを分析を行うことで大数の法則によりその期待値が一定の値に収束する」に従っている．また空間バイアスに関しては，図-2 に示したように通行止め区間を含む一定の面積を有する広いエリア内の道路ネットワークを対象に推計を実施することで緩和する．

5. リニューアル工事に伴う基礎分析

(1) 工事開始前後での主要周道路での速度変化

工事前後において，旅行速度が相対的にどのような変化しているのかを確認したものが図-3 である．

図-3 は主要道のみを対象としており，速度変化はリンク別速度差（工事前ー工事中）として表している． ハーバーウェイにて，大きな速度差が生じていることが確認できる．

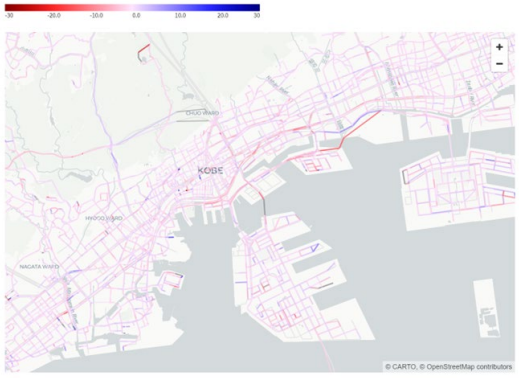


図-3 主要道路での速度変化（工事前ー工事中））

(2) 工事に伴う対象エリアへの流入

通行止めを行ったエリアに対して，どこから車両が来訪し，工事によって，どれくらい交通量が増加したのかを示したものが図-4 である．この図-4 は，分析期間中に収集されたトヨタ自動車コネクテッドカーデータのみで得られた結果である．図-4 から工事期間中に通行止めエリアから 30km/h 程度は離れた場所からの通過交通が増加していることが確認できる．

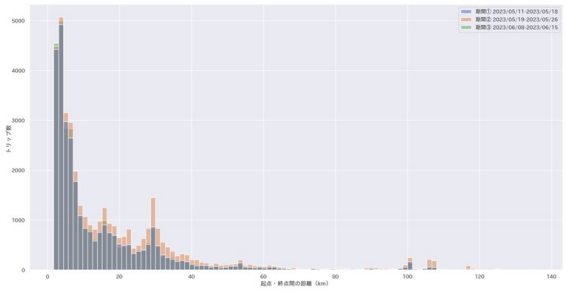


図-4 通行止めエリアへの流入した車両の起点からの距離分布

5. リニューアル工事前後での MFD 形状の分析

(1) 工事開始前後での MFD の形状変化

工事開始前後の平日 5 日間における MFD の形状を示したものが，図 5 と図 6 である．

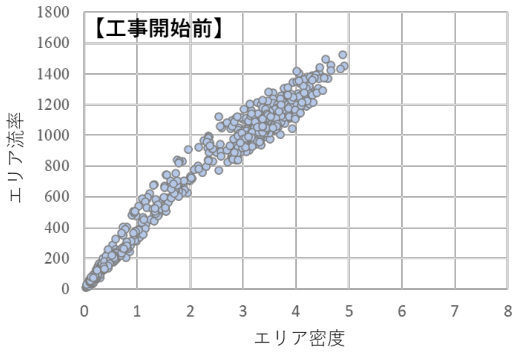


図-5 工事開始前の MFD 推定結果

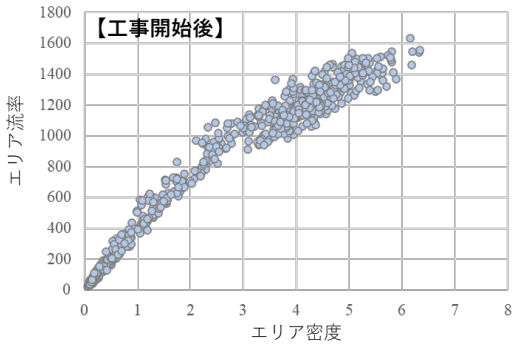
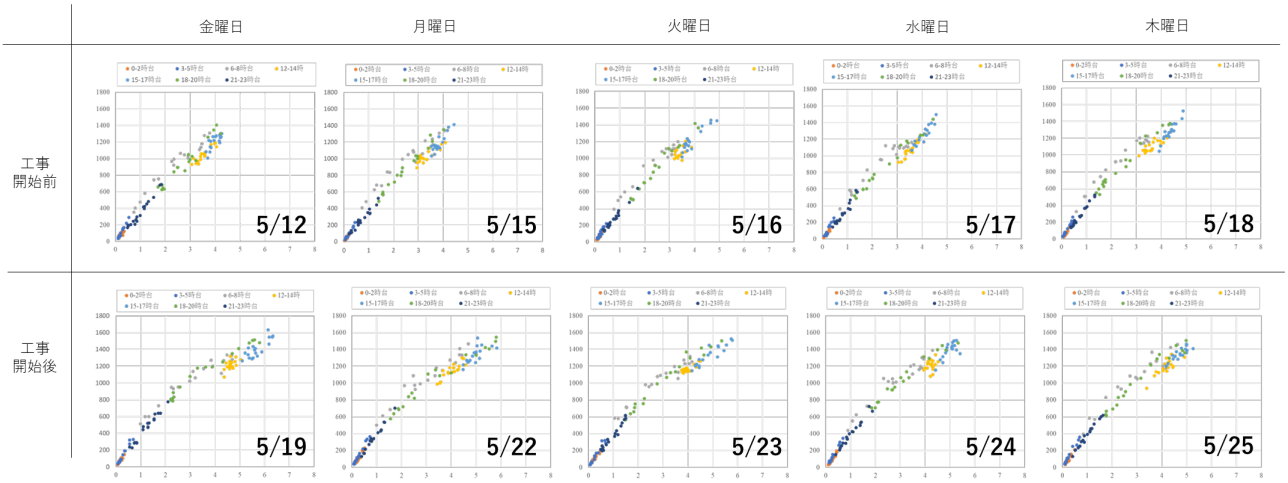


図-5 工事開始後の MFD 推定結果

表-2　日別 MFD 推定結果



MFD 形状[9]として，原点から密度に比例して流率が増加する領域が自由流領域，密度の増加に伴って流率も増加するものの，密度に対する流率の弾力性が自由流領域に比して小さくなる領域，密度の増加の増加に伴って速度が低下する混雑流領域，混雑流領域よりもさらに流率の弾力性が低下している領域を渋滞流老域と定義される．その観点で，図 5 と図 6 を比較すると**工事**開始前の MFD では自由流領域，混雑流領域が存在しているのに対して，工事開始後には加えて渋滞流領域にプロットが存在していることが確認できる．分析対象エリア内に位置する都市高速道路の通行止めにより，一般道への迂回を余儀なくされることを踏まえると，その結果が MFD 形状に反映されていることも理解できる．

表-2 には日別の MFD 推定結果を示しているが，工事開始前と工事開始後では形状が明らかに異なっていること，図-5 と図-6 の関係同様，工事開始後においては渋滞流領域へのプロットが確認できる．特に表-2 における工事開始後の各日の図からは，渋滞領域のプロットは，朝夕ピーク時間にも存在する一方で，どちらかといえば，日中 12-14 時，15-17 時の時間帯においても存在しており，工事開始前には一般道が混雑程度であったところ，工事開始後に面的な渋滞が発生している状況を表現できていると考えられる．

6．おわりに

本研究では，阪神高速道路において実施されたリニューアル工事を対象として，その工事が一般道路に与えた影響を一般車両のコネクティッドデータを用いた MFD 形状変化を分析した．通行止め前後において，MFD 形状には変化が確認され，通行止めを含むエリアにおける面的な影響度の把握をコネクテッドカーデータを用いることで定量的に示すことができた．

一方で，本研究での分析は数式から得られた結果を図化し，その特徴を捉えるに留まっており，今後統計的解釈を加え，分析結果に厚みを持たせることが必要である．

今回の分析結果はトヨタ自動車のコネクテッドカーデータを用いた分析であるが，ETC2.0 をはじめとする異なるデータを用いた場合でも得られる結果が同様であるのかについての確認を行うことで，今回得られた結果の正当性についても確認が必要であると考えている．

参考文献

1) Mahmassani, H., Williams, J.C., Herman, R., Investigation of network-level traffic flow relationships: some simulation results. Transp. Res. Rec. 971, pp.121–130, 1984.
2) Ardekani, S., Herman, R., Urban network-wide traffic variables and their relations. Transportion. Science. 21, pp. 1–16, 1987.
3) Daganzo, C.F, Urban gridlock: macroscopic modeling and mitigation approaches. Transportation Research Part B: Methodol. 41, 49–62, 2007.
4) Daganzo, C.F., Geroliminis, N., 2008. An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic. Transportatiopn. Research. Part B: Methodol. 42, pp.771–781, 2008.
5) Daganzo, C.F., Gayah, V.V., Gonzales, E.J., Macroscopic relations of urban traffic variables: bifurcations, multivaluedness and instability. Transp. Res., Part B: Methodol. 45, pp. 278–288, 2011.
6) Keyvan-Ekbatani, M., Papageorgiou, M., Papamichail, I. Urban congestion gating control based on reduced operational network fundamental, diagrams. Transportaton. Research. Part C 33, pp.74–87, 2013.
7) 王鵬飛, 和田健太郎, 赤松隆, 杉田正俊, 名古屋利一, 鷲見浩：長期間観測データを用いた Macroscopic Fundamental Diagram の特徴づけ： 仙台市および京都市におけるケース・スタディ， 交通工学論文種, 第 2 巻第 5 号 pp.11-20, 2016.
8) Nagle, A., Gayah, V., The accuracy of network-wide traffic state estimations using mobile probe data. Transportation Research. Record. 2421, pp.1–11, 2014.
9) 吉井稔雄, 奥原瑠依, 坪田隆宏：交通事故の影響による MFD 形状変化分析， 交通工学論文集 特集号 A,

第 7 巻 2 号, pp.A_201-A_206, 2021.
10) Du, J., Rakha, H.,Gayah, V.V., Deriving macroscopic fundamental diagrams from probe data: Issues and proposed solutions, Transportation Research Part C, Volume 66, pp.136-149, 2016.
11) 阪神高速道路株式会社 3 号神戸線（京橋～摩耶）終日通行止めによるリニュアル工事 プレスリリース（2023 年 3 月 28 日）, https://www.hanshin-exp.co.jp/company/files/230328pressrelease.pdf （2023 年 9 月 24 日アクセス）
12) Edie, L.C., Discussion of traffic stream measurements and definitions. In: The 2nd International Symposium on the Theory of Traffic Flow, 1965/

(2023. 10. 13 受付)

IMPACT OF URBAN EXPRESSWAY RENEWAL CONSTRACTION ON THE MFD SHAPE BY USING CONNECTED CAR DATA

Toshiyuki NAKAMURA and Masahiro KUWAHARA

Expressways that have been in operation for more than 50 years are rapidly aging, and large-scale renewal constraction is necessary to ensure safe, secure, and comfortable use of the expressways in the future. Expressway administrators are taking various measures to reduce the social impact of traffic restrictions as much as possible, and are making every effort to minimize the impact of such restrictions.

In this study, we analyze the impact of the renewal constraction on the Hanshin Expressway on the shape of MFDs using connected data of vehicles. The MFD shapes were found to change before and after the traffic restrictions, quantitatively showing the understanding of the areal impact in the area including the traffic restrictions.