

# MFDを用いた道路ネットワーク性能の動的変化解析手法

奥原 瑠依<sup>1</sup>・吉井 稔雄<sup>2</sup>・坪田 隆宏<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 愛媛大学大学院 理工学研究科 (〒790-0826 愛媛県松山市文京町3)

E-mail: okuhara.rui.15@cee.ehime-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 愛媛大学大学院教授 理工学研究科 (〒790-0826 愛媛県松山市文京町3)

E-mail: yoshii@cee.ehime-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 愛媛大学大学院講師 理工学研究科 (〒790-0826 愛媛県松山市文京町3)

E-mail: t.tsubota@cee.ehime-u.ac.jp

本研究では、突発事象発生やOD交通量の変化によって道路ネットワーク性能が動的に変化することを示す。具体的には、46都道府県の各県庁所在地における道路ネットワークを対象として、プローブデータを用いて事故発生の有無別、時間帯別にMacroscopic Fundamental Diagram (以下, "MFD")を推定し、同MFDの形状変化を分析する。折れ線回帰モデルを適用してMFDを推定し、その形状変化を分析した結果、事故発生の有無、時間帯の違いによってMFD形状が有意に変化することが示された。

**Key Words :** *Macroscopic Fundamental Diagram, gridlock, road network performance, traffic flow*

## 1. はじめに

2011年3月の東日本大震災の際には、グリッドロックの同時多発的な発生により、交通網が麻痺する状態となった。グリッドロックが発生すると、道路上でボトルネックが発生し、ボトルネックから渋滞が延伸することで、交差する道路の車両の右左折を妨げることとなり、最終的には元のボトルネックまで渋滞が延伸し、渋滞の先頭がなくなり、車両が固まり動くことができなくなってしまう。さらに、グリッドロックが拡大していくと、道路ネットワークの処理能力が落ち、交通容量が通常時よりも低下する。このような大規模な渋滞が発生すると、個人の時間が損失されるのはもちろんのこと、渋滞によるCO<sub>2</sub>排出で環境の悪化につながったり、緊急車両の通過を妨げたりすることも考えられる。道路ネットワークの処理能力の低下を回避するためには、グリッドロックの発生を未然に捉え、適切なタイミングでの交通麻痺を回避するような制御の実施が求められる。その際には、交差点や単路部における個別の交通状態に着目するのではなく、道路ネットワーク全体で交通流状態を把握する必要がある。

都市内道路ネットワークの交通流状態把握手法として、Daganzo<sup>1)</sup>は対象ネットワークエリア内における交通

流動量と交通密度との関係を巨視的なレベルで捉えるMacroscopic Fundamental Diagram (以下, "MFD")を提案しており、また王ら<sup>2)</sup>は、那覇市・仙台市・京都市の一般道の渋滞を対象に車両感知器により観測されたデータを用いた分析を行い、MFDの特徴を明らかにするとともに、渋滞領域の発生メカニズムを分析している。その結果、平日休日の違いや天候など、特定の交通需要や交通環境下において渋滞領域が発生することを示した。雨天時には道路リンクの性能が低下すると考えられることから、同分析結果は、OD交通量や道路リンク性能の変化によってMFDの形状が動的に変化することを意味している。また、吉井<sup>3)</sup>らは愛媛県松山市の道路ネットワークを対象に、交通事故の発生によってMFDが動的に変化することを示している。このように、OD交通量などの需要側の要因や、交通事故や悪天候による障害といった供給側の要因によってMFDの形状は変化する。従って、グリッドロックの発生を予測する際には、このようなMFD形状の変化を考慮する必要がある。

他方、交通流観測技術に目を向けると、都市内高速道路などでは感知器が密に設置されており、時間的に連続で空間的に高密度での交通流観測がなされてきたものの、一般道路においては、感知器の設置が限定的であることから高密度での交通流観測が困難であった。しかし

ながら、近年のプローブ車両の増加により、一般道路においても、空間的に高密度での交通流観測が可能となった。Gituru ら<sup>9)</sup>は ETC2.0 プローブデータを用いて、47 都道府県の県庁所在地における県庁周辺街路網を対象に MFD を推定し、その形状の分析から渋滞流領域を含まない形状と含む形状がそれぞれ存在することを示している。

本研究は、全国の県庁所在地道路ネットワークを対象に、MFD で表される道路ネットワーク性能の動的な変化要因を実証的に示すことを目的とするものである。具体的には、ETC2.0 プローブデータを用いて MFD を推定する手法を 46 都道府県県庁所在地の県庁所在地道路ネットワークに適用する。MFD の変化要因には供給側の要因として交通事故を、需要側の要因として時間帯の違いを考慮し、事故発生の有無別、時間帯別に MFD を推定する。これらの要因の有無別に MFD 形状の差異を調べることによって、道路ネットワーク状況の変化が MFD 形状に与える影響を分析する。

## 2. プローブデータを用いたエリア交通流状態算定手法

### (1) プローブエリア流率とプローブエリア密度

本研究では、Gituru ら<sup>9)</sup>による手法を用いて、プローブ車両軌跡のみを用いてネットワーク交通流状態を記述する。具体的には、以下の式(1)と式(2)によって、単位時間あたりに対象エリア内を走行するプローブ車両軌跡データを集計し、それぞれプローブエリア流率、プローブエリア密度と定義する。なお、以下の分析では集計時間単位を 1 時間として分析を行う。

$$q_t = \sum_{i \in A_t} d_{it} \quad (1)$$

$$k_t = \sum_{i \in A_t} o_{it} \quad (2)$$

$q_t$  : 時間帯  $t$  におけるプローブエリア流率[台・km/時間]  
 $k_t$  : 時間帯  $t$  におけるプローブエリア密度[台・時/時間]  
 $d_{it}$  : 時間帯  $t$  におけるプローブ車両  $i$  の走行距離[km]  
 $o_{it}$  : 時間帯  $t$  におけるプローブ車両  $i$  の走行時間[時間]  
 $A_t$  : 時間帯  $t$  に対象エリア内を走行したプローブ車両の集合

### (2) 正規化エリア流率と正規化エリア密度

プローブ車両は現在普及段階であり、本研究で用いる ETC2.0 を搭載した車両については、図-1 に示すように時間の経過とともにその車両台数が増加している<sup>9)</sup>。このため ETC2.0 プローブ車両が全車両に占める割合（以下“プローブサンプル率”）が変化することから、プローブ

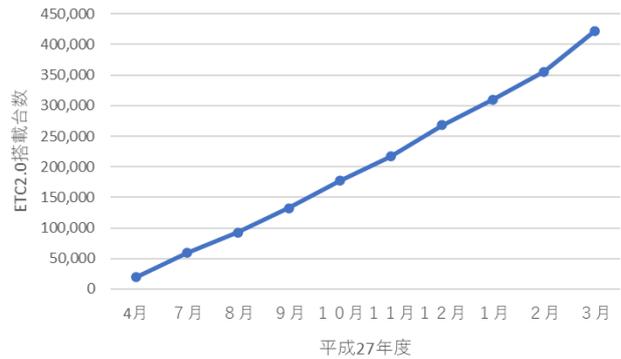


図-1 ETC2.0搭載台数

ブエリア流率、プローブエリア密度を一律のプローブサンプル率を用いて拡大する方法によって、全車両による集計交通流率、集計交通密度を推定することは適切ではない。また、時々刻々と変化するエリア内におけるプローブサンプル率を計測することも容易ではない。そこで、プローブサンプル率が継続的に増加している現状において、推定される全車両による集計交通流率、ならびに集計交通密度の値が一定の傾向をもって変化することを回避するため、1ヶ月平均のプローブエリア流率とプローブエリア密度を用いて両交通流状態量の正規化を行う。具体的には、式(3)(4)にて算定した1ヶ月平均のプローブエリア流率、プローブエリア密度を用いて、各時間帯で観測されるプローブエリア流率、プローブエリア密度をそれぞれの月平均値で除することによって正規化し、それぞれ正規化エリア流率、正規化エリア密度と定義する。また、両状態量で表現されるネットワーク交通流状態をエリア交通流状態（以下、“ATS (Area Traffic State)”）として定義する。

$$q_m = \frac{\sum_{t \in M} q_t}{\sum_{t \in M} 1} \quad (3)$$

$$k_m = \frac{\sum_{t \in M} k_t}{\sum_{t \in M} 1} \quad (4)$$

$$Q_t = \frac{q_t}{q_m} \quad (5)$$

$$K_t = \frac{k_t}{k_m} \quad (6)$$

$q_m$  : 1ヶ月平均のプローブエリア流率[台・km/時間]

$k_m$  : 1ヶ月平均のプローブエリア密度[台・時/時間]

$M$  : 1ヶ月間の時間帯の集合

$Q_t$  : 時間帯  $t$  における正規化エリア流率

$K_t$  : 時間帯  $t$  における正規化エリア密度

## 3. 分析方法

### (1) 折れ線回帰によるMFD推定手法

本研究では、式(7)に示すように、式(5)(6)で定義した正規化エリア流率を目的変数とし、正規化エリア密度を

説明変数とする折れ線回帰モデルを用いて MFD の推定を行う。なお、図-2のように折れ線回帰においてはセグメント数を3とし、各セグメントの境界に位置する折曲点を2点とする。よって、推定されるMFDは、2つの折曲点 ( $p_1, p_2$ ) を含み、 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ をそれぞれの傾きの変化量とする3つの線分にて構成されるが、折曲点の正規化エリア密度の組み合わせを0.1刻みに設定した推定を行い、全ての組み合わせの中から最も高い補正 $R^2$ を得られる場合の折曲点の組み合わせとパラメータベクトルを推定結果とする。なお、推定されたMFDの折曲点による領域を密度の小さい方から自由流、混雑流、渋滞流と定義する<sup>9)</sup>。

事故発生の有無別、時間帯別にMFDを推定し、次節の式を用いて、MFDの形状の差異について統計的有意性を検定する。

$$y = \beta_1 x + \beta_2(x - p_1)d_1 + \beta_3(x - p_2)d_2 \quad (7)$$

$y$ : 正規化エリア流率

$x$ : 正規化エリア密度

$p_{1,2}$ : 折曲点の正規化エリア密度

$\beta_{1,2,3}$ : パラメータ

$d_1$ : ダミー変数(0if  $x \leq p_1$ )

$d_2$ : ダミー変数(0if  $x \leq p_2$ )

## (2)MFD形状変化分析

本節では、前節の方法で推定されるMFDの形状の差異について、その有意性を検定する。群間変動の不偏分散と群内変動の不偏分散の比はF分布に従うことから、式(8)(9)(10)を用いて、式(10)のF値を検定統計量として検定を行う。本稿において、群とは、全体と事故の発生有無別、あるいは全体と時間帯別のことを表す。

$$S_A = S - S_E \quad (8)$$

$$f_A = f - f_E \quad (9)$$

$$F = \frac{S_A/f_A}{S_E/f_E} \quad (10)$$

$S$ : 全体の残差平方和

$S_A$ : 級間平方和

$S_E$ : 事故有無別または時間帯別の残差平方和

$f$ : 全体の自由度

$f_A$ : 級間の自由度

$f_E$ : 事故有無別または時間帯別の自由度

## 4. 分析対象エリアとデータ概要

### (1) 分析対象エリア

本研究では、46都道府県の各県庁を中心とする9km四方のエリアを対象とする。

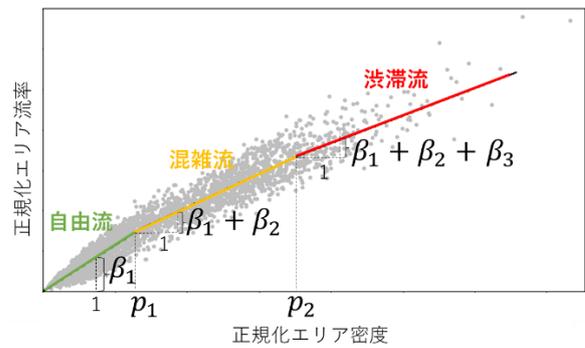


図-2 MFD概要

### (2) 分析データ

本研究では、分析対象期間を2015年4月1日から2016年3月31日までの平日246日とし、46都道府県県庁所在地における、ETC2.0プローブデータと人身事故データの2つのデータを用いて分析を行う。

#### a) ETC2.0プローブデータ

広域道路ネットワークにおける交通状況を把握するために、本研究では、ETC2.0プローブデータを用いる。ETC2.0プローブデータは、一般道においても観測が可能で、走行距離200mごと、進行方向変化45度以上、挙動履歴が閾値を超えた場合に、ETC2.0搭載車両の緯度・経度、時刻等が記録される。これより、2点間の走行距離、走行時間等が算出できる。

#### b) 人身事故データ

人身事故データには、事故の発生場所や発生時刻等が記載されている。記録された時刻に基づいて1時間単位で対象エリア内の事故件数を集計する。

## 5. 分析結果

### (1)事故の発生によるMFD形状変化

先行研究<sup>7)</sup>において、愛媛県松山市を対象に、3年分のETC2.0プローブデータを用いて、事故が周辺広域道路ネットワーク交通流に与える影響の分析方法を構築し、1時間単位の各時間帯において、事故がネットワーク交通流に与える影響の分析を行っている。事故の発生によって、当該時間帯にとどまらず1時間後、2時間後の時間帯においても平均相対旅行速度が有意に低下する現象が生じていること、すなわち、事故の発生によって、2時間経過してもなお事故の影響によりネットワーク交通流状態が変化する可能性があることを示した。そこで、全ATSデータを、2時間以降に事故が発生した時間帯、すなわち、2時間前、1時間前または当該時間帯において事故が発生した時間帯（以下、“事故有”）、とそれ以外の時間帯（以下、“事故無”）に分類し、各都道府県に

において事故有と事故無のMFDをそれぞれ式(7)により推定する。例として、宮城県で事故発生の有無別にMFDを推定した結果を図-3、表-1に示す。宮城県の対象エリアで対象期間内に発生した事故件数は1,241件である。図-3より、事故無のMFDと比較して、事故有のMFDはエリア流率の値が小さい下方に位置していることが読み取れる。次に、事故発生の有無によるMFDの形状の差異について有意性を検定した。事故発生の有無別に推定したMFDによる残差平方和と、事故発生の有無を考慮せずに全ATSで推定したMFDの残差平方和との差の有意性を、式(10)から得られたF値を用いて検定したところ、表-2に示すとおり、両者に有意な差があることが示された。すなわち、事故発生の有無別にMFDの形状が異なることが示された。残りの45都道府県に対して同様の分析を行ったところ、島根県以外の全ての地域において事故発生の有無別にMFDに有意に差があった。これにより、事故がMFD形状に影響を与えていることが示された。

(2)時間帯の違いによるMFD形状変化

時間帯を7:00~9:59の間の朝時間帯、12:00~14:59の間の昼時間帯、16:00~18:59の間の夕時間帯と定義し、各都道府県においてMFDをそれぞれ式(7)により推定する。なお、時間帯別のMFD推定には、2時間前、1時間前、または当該時間帯に事故の発生していない場合のデータを用いた。例として、宮城県で朝昼夕の時間帯別にMFDを推定した結果を図-4、図-5、図-6、表-3に示す。また、朝昼・朝夕・昼夕の対について、MFD形状の差異の有意性を検定した。まず朝昼の対について、朝昼の時間帯別に推定したMFDによる残差平方和と、朝と昼の時間帯すべてのデータを用いて推定したMFDの残差平方和との差の有意性を、式(10)から得られたF値を用いて検定したところ、表-4に示すとおり、両者に有意な差があることが示された。すなわち、朝と昼のMFDの形状が異なることが示された。同様に、朝夕、昼夕についても式(10)にて、MFD形状の有意性をF値用いて検定したところ、表-4に示すとおり、MFDの形状が異なることが示された。さらに、残りの45都道府県で同分析を行ったところ、朝と昼の時間帯の対に関しては43都道府県、朝と夕方の時間帯の対に関しては全都道府県、昼と夕方の時間帯の対に関しては40都道府県と、概ね全都道府県ですべての時間帯についてMFDの形状に有意に差があるという結果を得られた。特に、朝と夕方の時間帯については、すべての都道府県においてMFD形状に差があったことから、朝は郊外から中心部への移動、夕方は中心部から郊外への移動といったようなODの変化によって、ボトルネックが変わり、MFD形状が変化したことが考えられる。

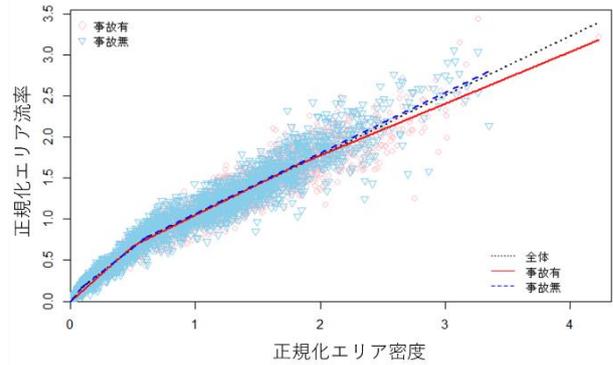


図-3 事故有無別MFD(宮城県)

表-1 事故有無別MFD推定結果(宮城県)

	全体		事故無		事故有	
	係数	T 値	係数	T 値	係数	T 値
$p_1$	0.1		0.1		0.5	
$p_2$	0.6		0.6		1.8	
$\beta_1$	1.8	43.6*	1.8	44.2*	1.4	94.3*
$\beta_2$	-0.6	-12.3*	-0.7	-12.5*	-0.6	-27.1*
$\beta_3$	-0.5	-30.3*	-0.4	-25.0*	-0.1	-5.3*
$R^2$	0.99		0.99		0.99	
sample	5,902		3,422		2,480	

\*有意水準 :  $p < 0.05$

表-2 事故有無別MFD形状変化(宮城県)

	平方和	自由度	F 値
全体	102.2	5,897	9.5*
事故有無別	101.3	5,892	
誤差	0.81	5	

$F_{0.05}(5,5897) = 2.2$ , \*有意水準 :  $p < 0.05$

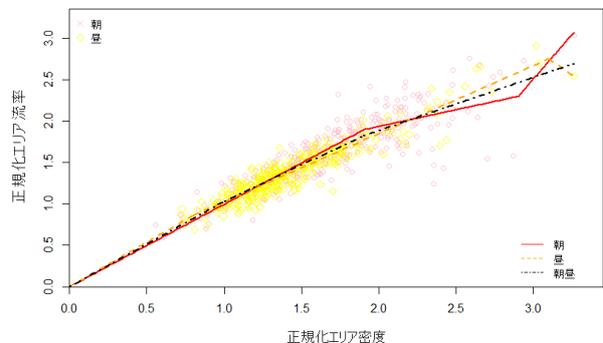


図-4 朝昼の時間帯別MFD(宮城県)

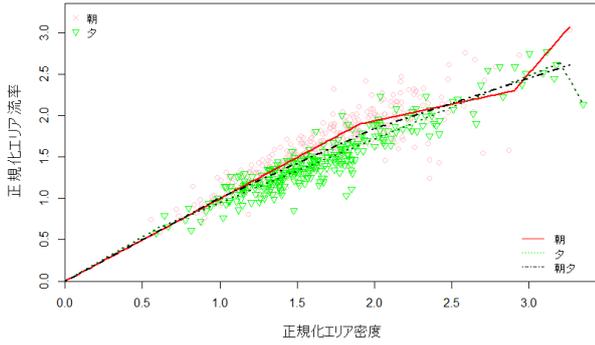


図-5 朝夕の時間帯別MFD(宮城県)

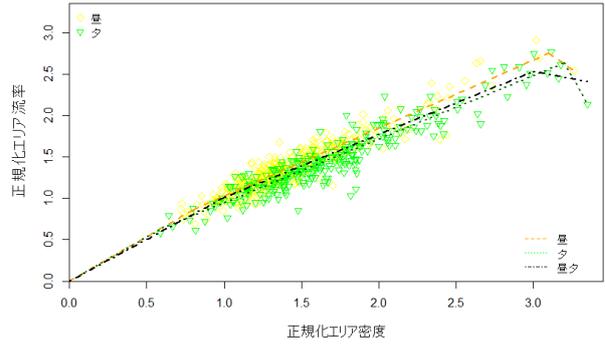


図-6 昼夕の時間帯別MFD(宮城県)

表-3 時間帯別MFD推定結果(宮城県)

	朝		昼		夕		朝昼		朝夕		昼夕	
	係数	T 値	係数	T 値	係数	T 値	係数	T 値	係数	T 値	係数	T 値
$p_1$	1.9		0.8		0.6		1.0		1.0		1.0	
$p_2$	2.9		3.1		3.2		1.9		2.0		3.0	
$\beta_1$	1.0	133.2*	1.1	69.7*	1.1	31.5*	1.0	81.6*	1.0	58.0*	1.0	109.0*
$\beta_2$	-0.6	-9.3*	-0.3	-8.2*	-0.3	-6.0*	-0.2	-4.5*	-0.2	-3.8*	-0.2	-11.4*
$\beta_3$	1.7	3.0*	-2.1	-2.8*	-4.1	-4.3*	-0.2	-4.3*	-0.2	-3.8*	-1.1	-3.9*
$R^2$	0.99		0.99		0.99		0.99		0.99		0.99	
sample	345		343		277		688		622		620	

\*有意水準 :  $p < 0.05$

表-4 時間帯別 MFD 形状変化(宮城県)

	朝昼			朝夕			昼夕		
	平方和	自由度	F 値	平方和	自由度	F 値	平方和	自由度	F 値
全体	18.5	683	6.5*	22.7	612	30.1*	12.0	610	21.9*
時間帯別	17.6	678		18.2	617		10.2	615	
誤差	0.9	5		4.5	5		1.8	5	

$F_{0.05}(5,683) = 2.2$ ,  $F_{0.05}(5,617) = 2.2$ ,  $F_{0.05}(5,615) = 2.2$ , \*有意水準 :  $p < 0.05$

## 6. おわりに

本稿では、46都道府県県庁所在地の道路ネットワークを対象に、ETC2.0プローブデータより算出した1時間単位の集計交通流率（プローブエリア流率）と集計交通密度（プローブエリア密度）を1ヶ月平均の値で除すことにより正規化された正規化エリア流率と正規化エリア密度を用いてネットワーク交通流状態（ATS）を規定した。同ATSを用いて、事故発生の有無別、朝昼夕の時間帯別にMFDの推定を行い、それぞれのMFD形状の差異の有意性について検定した。まず、事故発生の有無別にMFDを推定したところ、45都道府県において、MFDの形状に有意に差があることが示された。すなわち、交通事故の発生がMFD形状に影響を与えていることが明らかになった。また、朝昼夕の時間帯別にMFDを推定したところ、朝と昼の時間帯の対に関しては43都道府県、朝と夕方の時間帯の対に関しては全都

道府県、昼と夕方の時間帯の対に関しては40都道府県と、概ね全都道府県ですべての時間帯についてMFDの形状に有意に差があるという結果を得られた。よって、時間帯の違いがMFD形状に影響を与えていることが示された。

今後は、本研究で得られた成果を踏まえ、プローブデータを用いたオンラインでのMFDの形状変化を示すシステムの構築を行う。このシステムを用いることで、グリッドロックを回避する交通制御を実施することによる渋滞緩和の実現が期待できる。

**謝辞：**本研究は、新道路技術会議「道路政策の質の向上に関する技術研究開発：交通事故リスクマネジメント手法の研究開発(代表：吉井稔雄)」の支援によって実施し、国土交通省よりETC2.0プローブデータを、ITARDAより人身事故データを頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Daganzo, C.F.: Urban gridlock: Macroscopic modeling and mitigation approaches, Transportation Research Part B, Vol.41, No.1, pp.49-62, 2007.
- 2) 王鵬飛, 赤松隆, 和田健太郎: Macroscopic Fundamental Diagram における渋滞領域発生メカニズムに関する実証研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.51, 2015.
- 3) 王鵬飛, 和田健太郎, 赤松隆, 杉田正俊, 名古屋利一, 鷺見浩: 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, 交通工学論文集, 第 2 巻, 第 5 号, pp.11-20, 2016.
- 4) 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, 第 7 巻, 第 2 号, p.A\_201-A\_206, 2021
- 5) Stephanie Wanjiku GITURU, Toshio YOSHII, Takahiro TSUBOTA and Hirotohi SHIRAYANAGI: A Study on the Characteristics of MFD determined by Probe Data, The 13th International Conference of Eastern Asia Society for Transportation Studies, Colombo, Sri Lanka, 2019.
- 6) 一般財団法人 ITS サービス高度化機構: ETC/ETC2.0(DSRC) 普及状況 ETC 総合情報ポータルサイト, <https://www.go-etc.jp/fukyu/>, 2015, (2020/02/20)
- 7) 奥原瑠依, 吉井稔雄, 坪田隆宏, 尾高慎二, 白柳洋俊: 交通事故が周辺広域道路ネットワークに与える影響の分析, 第 39 回交通工学研究発表会論文集, Vol.39, pp.327-331, 2019 (2021.?.? 受付)

DYNAMIC CHANGE ANALYSIS METHOD OF  
ROAD NETWORK PERFORMANCE USING MFD

Rui OKUHARA, Toshio YOSHII and Takahiro TSUBOTA