

動的・静的道路交通環境を考慮したボトルネック交通容量推定と渋滞発生メカニズムに関する分析 Estimation of Bottleneck Capacity and Analysis of Traffic Congestion Mechanism using Dynamic and Static Traffic Environment Factors

金 進英¹, 兒玉 崇², 北澤 俊彦², 嶋田 真尚³, 大藤 武彦³

Jinyoung KIM¹, Takashi KODAMA², Toshihiko KITAZAWA², Masanao SHIMADA³ and Takehiko DAITO³

道路上では、ある地点が上流に比べて交通処理能力が低下するか、または、交通量が増加することによってボトルネックが生じ、その地点を先頭に渋滞が発生する。本研究では、ボトルネックにおける動的・静的道路交通環境の関係を分析することで、渋滞発生箇所の特徴や渋滞発生メカニズムを明らかにする。具体的には、車両検知器に基づく観測交通量を用いて算出した交通容量や渋滞発生確率と道路構造の関係を分析する。また、動的要因として時間帯、曜日、降水量、合流部の合流交通量と合流比率などと、静的要因として勾配、曲線半径、サグ、クレストなどを用いて交通容量推定モデルを構築することで、前述の関係を検証する。最後に、現在化・潜在化している渋滞と道路交通環境の関係を分析することで、渋滞発生メカニズムについて検討を行う。本研究は、現存道路におけるボトルネックの評価だけではなく、新規計画道路におけるサービス水準評価や、渋滞対策、交通流シミュレーションへの活用なども期待できる。

Keywords: 交通容量推定, 交通渋滞, ボトルネック, 道路交通環境

1. はじめに

都市内高速道路では、道路構造や交通環境が複雑であり、交通集中渋滞の原因となるボトルネック箇所が多数存在する。ボトルネックは合流部、サグ部など、交通需要量が容量を超過する箇所であるが、その要因は多様であり、処理能力や車線利用状況も地点によって異なる。そのうえ、他のボトルネックとの位置関係や処理能力の大小により、顕在化していないボトルネックも多数存在すると考えられる。

そのため、渋滞対策の検討では、処理能力に影響を与える要因を抽出し、渋滞発生メカニズムを時系列・空間に着目して把握したうえで、当該ボトルネックへの対策後に現在潜在しているボトルネックが新たなボトルネック箇所として顕在化することのないよう留意して対策を検討することが必要であり、それには顕在化しているものだけでなく潜在しているボトルネックの処理能力の把握が求められる。

そこで、今般、車両検知器データに基づく交通状態と、道路線形や構造、その他交通状況に影響を与えると考えられる要因との関係を分析して、代表的なボトルネック箇所の渋滞発生メカニズムの見える化を図るとともに、渋滞対策等の効果を事前評価するための交通流シミュレーション等への活用を見据え、顕在化・潜在化するボ

トルネック箇所の特定制と処理能力を設定する手法について検討することを目的とする。

2. 交通容量に関する既存研究

ボトルネックにおける交通容量の把握および渋滞発生メカニズムの分析に関しては長年にわたって様々な研究が行われてきた。

越ら¹⁾²⁾は、都市間高速道路を対象に交通現象を調査し、渋滞が発生するメカニズムとして車線利用率に着目をして分析を行った。観測された渋滞発生時交通量を交通容量と定義して、車線利用率の不均等が交通容量に及ぼす影響を明らかにした。小谷ら³⁾も高速道路を対象に観測交通データを用いて、車線利用率や車間距離などを算出して連続的な交通容量が推定可能な計算手法を提案した。しかし、越らや小谷らの研究は、観測交通データのみから交通容量を定義、または算出しているため、交通容量の精度について議論をする必要がある。また、渋滞が発生しているボトルネックの原因がサグ部であると前提しているため、他の静的および動的な道路交通環境が交通容量の変動に及ぼす影響が分析されていない。

吉川ら⁴⁾と村重ら⁵⁾⁶⁾は、重回帰モデルに基づいてボトルネックの交通容量と道路構造の関係を分析した。特に村重らは、推定された交通容量を用いて渋滞の発生・

1 正会員, 工学博士, (株) 交通システム研究所
〒532-0011 大阪市淀川区西中島7丁目1番20号
2 正会員, 阪神高速道路(株)
3 正会員, (株) 交通システム研究所

E-mail: kim.jinyoung@tss-lab.com Phone: 06-6101-7001

定着現象を分析することで、渋滞発生メカニズムについて議論を行った。しかし、吉川らや村重らの重回帰モデルにおける説明変数は、物理的な道路構造における項目が多く、動的に変動する交通状況や気候などがほとんど考慮されていない。

そこで本研究では、車両検知器データに基づく交通状態と、道路線形や構造、その他交通状況に影響を与えると思われる要因との関係を分析し、ボトルネック処理能力を設定する手法について検討した結果を示す。また、ボトルネックの交通容量と、渋滞持続時間帯数の算出や渋滞発生確率分布の推定結果と一緒に分析を行うことで、ボトルネックの渋滞が発生した原因について整理をする。最後に、ボトルネック渋滞の顕在化・潜在化を分析することで、渋滞発生メカニズムについても議論を行う。

3. 基礎データとボトルネック抽出

3.1 基礎データの整備

本研究における対象ネットワークおよびデータは以下のとおりである。

(1)検討対象路線

- ・阪神高速道路全線：交通集中渋滞が発生する主要路線を対象とする。

(2)データ期間

- ・平成 26 年度(2014)～平成 27 年度(2015)の 2 年間

(3)基礎データ

- ・交通データ(交通管制システムデータ): 車両検知器データ(交通量、占有率、速度)、障害データ、渋滞データ、入路制御データ、管制業務日誌
- ・道路構造データ：幅員、車線数、分合流地点等情報、本線料金所等情報、縦断線形、平面線形など
- ・気象データ(気象庁)：天候、降水/降雪データ

3.2 ボトルネックの抽出

「渋滞量日報(発生地点別、0.5Km 単位)」に基づく渋滞発生状況を整理すると図 1 に示すとおりであり、約 4 割が「入口合流」と「本線合流」の合流部に起きた渋滞であり、渋滞発生地点が特定されていない「その他(不明: kp で先頭地点を記録)」の渋滞も約 4 割に達している。

一方、出口や延伸、料金所などの渋滞も約 1 割を占めている。「出口渋滞」と「他路線からの延伸」は渋滞の先頭が明確ではないため、渋滞が発生した原因を明かすことが困難である。また、「本線料金所」は、車両の行動や道路構造が特殊であるため、別途の分析が必要であると思われる。したがって、ここでは、「出口渋滞」と「他路線からの延伸」、「本線料金所」を除いたボトルネックの渋滞を対象に分析を行うこととする。

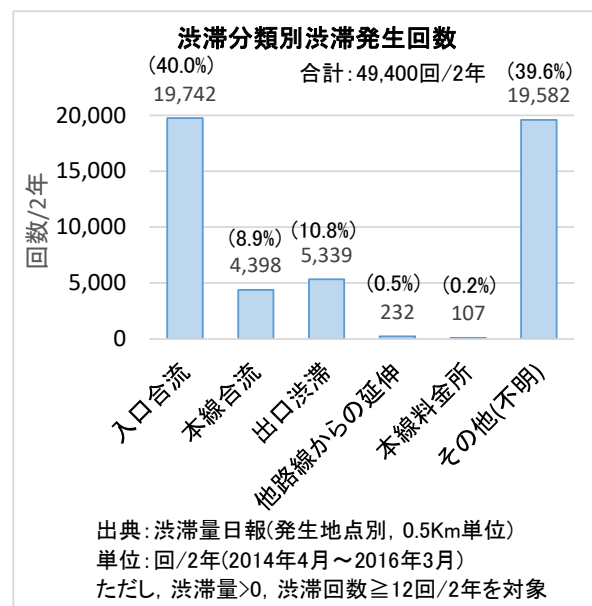


図 1 交通集中渋滞の渋滞分類別発生回数

ボトルネックとは、その地点の交通通過処理能力（交通容量）を超える交通需要が流入した時に交通渋滞が発生する地点のことを言い、渋滞が発生した区間の先頭(最下流側) 地点を称する。

本研究では、観測交通速度が 40km/h 以下が 15 分以上続いている場合を渋滞流と定義した。車両検知器単位区間（以下、JDP）単位の交通データから渋滞流区間と時間帯を探索し、渋滞地点の下流側へ渋滞流判別をしていくことで、渋滞発生先頭地点（ボトルネック、BN）を判別することができる。JDP 番号の隣接関係データを用いて、ネットワーク上の JDP 番号の上・下流を区分し、路線の最上流から下流へ探索していきながら、渋滞流と BN の判別を行う。一方、BN として判別された渋滞の発生時間帯が夜間（21 時～6 時）の場合、渋滞発生後の平均交通量が 150 台/5 分/車線以上の場合、2 年間の BN 渋滞発生件数が 48 回以下（1 回/月）の BN 地点のデータは対象外とした。

図 2 で表しているように、車両検知器データに基づいて渋滞として判別されるのは、JDP 区間内に設置された検知器の位置（赤色塗りつぶしの逆三角形）である。すなわち、BN と判別された検知器とその下流に位置する渋滞が判別されていない検知器の間に BN の（単独、または複数の）原因になる要因が存在し、発生した渋滞が延伸して BN の上流検知器で観測される。BN の渋滞として判別された検知器（BN 上流と称する）とその下流側の検知器（BN 下流と称する）の間をボトルネック区間と定義すると、BN 上流における渋滞に影響を及ぼす道路構造要因はボトルネック区間内に存在する。また、BN 上流における観測交通容量（渋滞発生時交通量と渋滞発生後捌け交通量）は、ボトルネックの原因が存在するボトルネック区間の下流、BN 下流で観測される。

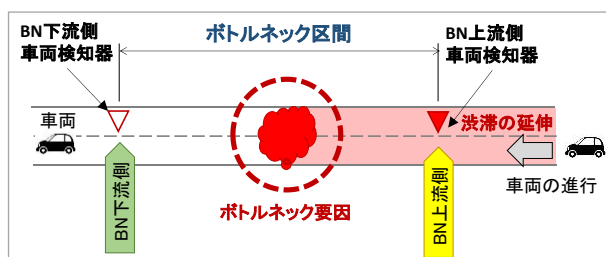


図2 ボトルネック区間の抽出

4. ボトルネックの道路交通環境分析

4.1 渋滞持続時間と観測交通容量

まず、前述した BN 抽出ルールに基づいて、研究対象期間に抽出された BN における渋滞継続時間帯数を整理した。その一例として、東大阪線上りの水走 (11.5kp) から高井田下流側 (3.0kp) までを表したのが図3の最上段のグラフである。このグラフの (黄緑) 棒グラフは渋滞継続時間帯数 (1=5 分) を、(黄色四角) 点グラフは渋滞発生件数を示している。また、この図の最下段には該当場所の道路構造データ (合流、分岐や平面要素の曲線半径、縦断勾配、クレスト、サグ等) が 0.1km 単位区間で表記されており、グラフと一緒に参照されたい。この図によると、渋滞継続時間帯数が一番多いのは JPD 区間 243 (高井田入口付近) で、その次は JPD247 (長田入口付近) の順になっている。

ここでは、Highway Capacity Manual (HCM) で定義される観測交通容量を参考に、渋滞発生時交通量と渋滞発生後捌け交通量を集計する。渋滞発生時交通量とは、5 分間平均速度が 40km/h 以下に低下した最初の 5 分間を除いたその直前 15 分間のフローレートである。渋滞発生後捌け交通量とは、渋滞が発生 (5 分間平均速度が 40km/h 以下に低下) した後、解消 (速度回復) するまでの全時間の平均フローレートである。

東大阪線上りの水走から高井田下流側までの渋滞発生時交通量 (観測交通容量) を表したのが図3の2段目の箱ひげグラフである。ここで、前述したように、ある BN における持続時間帯数と関係のある渋滞発生時交通量はその下流側で観測されていることと見なす。このグラフによると、長田合流の下流の観測交通容量は少なく、高井田合流直前で大きくなったものの、合流後にまた少なくなっていることが分かる。

4.2 渋滞発生確率分布の推定

BN における渋滞発生確率は、以下の式 (1) のように、渋滞発生交通量がある臨界交通量より小さい確率として定義することができる。

$$F_c(q) = \text{Prob}(c \leq q) \quad (1)$$

ここで、

$F_c(q)$: 臨界交通量 c の累積確率分布関数

c : 臨界交通量

q : 観測交通量

ここでは、二項ロジットモデルに基づいたロジスティック回帰分析を用いて渋滞発生確率分布の推定を行った。ロジスティック分布は式 (2) に示すとおりである。

$$F(q) = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \beta q)}} \quad \beta > 0 \quad (2)$$

上記の式に基づいて渋滞発生確率分布の推定を行った結果値が表1と、結果値を用いた渋滞発生確率分布が図3の3段目の線グラフである。図3のグラフによると、場所によって渋滞の発生確率が異なり、高井田合流の上流部は交通量が 120 台/5 分の場合の渋滞発生確率は 10% である反面、高井田の下流部は 33% に達していることが分かる。

表1 渋滞発生確率分布の推定結果

BN 上流 JDP	α (定数)		β	
	係数	オッズ比	係数	オッズ比
247	-12.536	.000	.096	1.101
244	-11.026	.000	.074	1.077
243	-9.430	.000	.073	1.075

4.3 交通容量推定モデルの構築

(1) 交通容量推定モデルの概要

交通容量推定モデルについては、以下の式 (3) のような重回帰モデルに基づいて推定を行った。

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (3)$$

ここで、

Y : 交通容量

x : 説明変数

β : 係数

重回帰モデルの従属変数は観測交通容量である渋滞発生時交通量を用い、説明変数は基礎データから表2のような動的要因および静的要因の項目を使用した。

ここで、国幹道ダミーというのは、国道や幹線道路などに接している場所を意味しており、阪神高速道路では神戸線下り (名神接続)、池田線上り (名神接続)、東大阪線下り (近畿道接続) の3路線にのみ適用される。これは本線交通量に近い合流が存在するため、通常の合流とは区別して説明変数とした。

表 2 交通容量推定モデルに用いられる説明変数の項目

	項目	単位・区分
動的 的要 因	週末	0:該当なし、1:該当
	日祝日	0:該当なし、1:該当
	6:00-10:00	0:該当なし、1:該当
	10:00-13:00	0:該当なし、1:該当
	13:00-17:00	0:該当なし、1:該当
	降水量	mm/h
	降水ランク	0:雨なし 1:0≦<3mm/h 2:3≦<10 3:10≦<20 4:20≦<30 5:30mm/h 以上
	降水継続時間	分
	雨有無	0:雨なし、1:雨あり
	入口・従流交通量	台/5 分
	合流比率	従流交通量/(従流+主流交通量)
	幅員	m
	サグ	0:該当なし、1:該当
	クレスト	0:該当なし、1:該当
静 的 的 要 因	要素長：右円弧	m
	要素長：左円弧	m
	要素長：右緩和曲線	m
	要素長：左緩和曲線	m
	要素長ランク	1:50m 以下 2:50<≦100 3:100<≦150 4:150<≦200 5:200m 以上
	max 要素長	m
	曲線半径：右円弧	km
	曲線半径：左円弧	km
	曲線半径：右緩和曲線	km
	曲線半径：左緩和曲線	km
	min 曲線半径	km
	曲線半径逆数	1/曲線半径
	曲線ランク	1:200m 未満 2:200≦<400 3:400≦<600 4:600≦<800 5:800≦<1000 6:1000m 以上
	縦断上り勾配	%
	縦断下り勾配	%
	勾配の差	absolute(上り勾配-下り勾配)
	上り勾配ランク	0:0% 1:0<≦2 2:2<≦4 3:4<≦6 4:6%以上
	下り勾配ランク	0:0% 1:-2≦<0 2:-4≦<-2 3:-6≦<-4 4:-6%以下
	上り勾配累積延長	km
	合流	0:該当なし、1:合流区間
	分岐	0:該当なし、1:分岐区間
	黄線区間	0:該当なし、1:分岐区間
	黄線区間長	m
	要素長ランク×上り勾配ランク	
	要素長ランク×下り勾配ランク	
	曲線半径逆数×上り勾配	
	曲線半径逆数×下り勾配	
	国幹道ダミー*	0:該当なし、1:該当

(2)モデルの推定結果

以上の説明変数を用いて、阪神高速道路の全路線系統別の交通容量推定モデルの推定を行った。その結果の一例として、東大阪線上りの交通容量推定モデルの推定結

表 3 交通容量推定モデルの推定結果

R	R2 乗	調整済み R2 乗	推定値の標準誤差	
.376 ^a	.142	.142	12.871	
変数名	推定係数		t 値	有意確率
	B	標準誤差		
(定数)	129.819	.123	1056.016	.000
降水ランク	-7.773	.295	-26.361	.000
下り勾配ランク	-4.194	.076	-55.393	.000
上り勾配累積延長	-22.082	.206	-107.348	.000
週末	-3.315	.143	-23.101	.000
日祝日	-10.976	.238	-46.064	.000
時間6_10	3.021	.073	41.164	.000
合流	-8.842	.129	-68.629	.000

果を表3に示す。

まず、モデルの推定精度である R 値や R2 乗値をみると、東大阪線上りの推定精度は高いとはいえない。しかし、有意である変数や係数の値からは、東大阪線上りの特徴が良く説明できる。東大阪線は縦断勾配の変動が大きく、長い上路勾配や激しい下り勾配が存在している。推定の結果をみると、下り勾配の係数は**-4.194**、上り勾配累積延長は**-22.082**になっており、それぞれ交通容量に悪影響を及ぼしていることが分かる。高井田合流付近は慢性的に渋滞が発生しており、この影響もあって合流が**-8.842**になっていると思われる。また、東大阪線上りは平日の午前中に出勤でよく使われる道路であるため、時間帯 6 時-10 時は**+3.021**、週末と日祝日はそれぞれ**-3.315**と**-10.976**になっていると思われる。

(3)モデル推定結果の考察

推定された交通容量推定モデルを用いて、東大阪線上りを対象に以下のような 4 つのケースで交通容量の推定を試みた。

- ・ケース 1：晴れの日、平日、7 時
- ・ケース 2：晴れの日、土曜日、13 時
- ・ケース 3：雨の日（5mm/h）、平日、20 時
- ・ケース 4：雨の日（5mm/h）、日曜、9 時

交通容量推定結果が図 3 の 4 段目のグラフである。橙色がケース 1 を、黄色がケース 2 を、青色がケース 3 を、灰色がケース 4 の計算結果である。このグラフによると、雨の日は晴れの日より交通容量が低く、平日よりも土曜日や日曜日のほうが低いことが分かる。長田合流後から少しずつ交通容量が下がるが、高井田合流付近からは少々上がっていく。高井田合流の上流は合流という変数が、下流は上り勾配累積延長という変数がそれぞれ交通容量に影響を及ぼしており、上・下流部ではほとんど同じ交通容量（118 台/5 分）になっている。

すなわち、高井田合流の上流と下流は、観測交通容量および推定交通容量はそれぞれ約 130 台/5 分と約 120 台/5 分で同じ値を示しているものの、渋滞発生確率が著しく異なるため、上流部と下流部で起きる渋滞のパターンも異なると考えられる。

以上の渋滞持続時間帯数や観測交通容量、渋滞発生確率と各地点の特徴をまとめたものが表 4 である。

5. 渋滞発生メカニズムの分析

5.1 渋滞の現在化・潜在化

近接するボトルネックにおいて互いに影響しあう渋滞発生・定着パターンを、図 5 に示す 2 種類に分類する。これらの現象について、渋滞が潜在化・顕在化するメカニズムを考察すると以下のとおりである。

＜タイプ 1（図 5 の上段）＞

- ・渋滞先頭の解消に伴う上流での渋滞の顕在化・定着
- ・ボトルネック A から（潜在する）ボトルネック B を超えて延伸する渋滞が継続している中で「ボトルネック A：顕在、ボトルネック B 潜在」
- ・ボトルネック A から渋滞が解消して、渋滞の先頭がボトルネック B に移行し、「ボトルネック A（解消 or 潜在化？）、ボトルネック B：顕在」
- ・ボトルネック B 先頭の渋滞が継続する「ボトルネック A（解消 or 潜在化？）、ボトルネック B：定着」

＜タイプ 2（図 5 の下段）＞

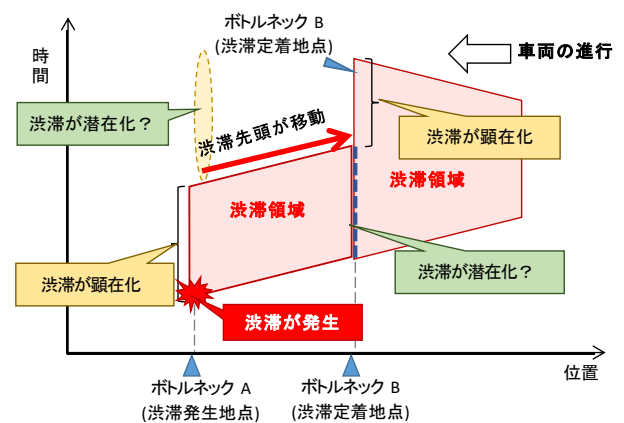
- ・下流側での渋滞発生（顕在化？）に伴う上流側渋滞の潜在化
- ・ボトルネック B から渋滞が発生継続する中で、「ボトルネック A：潜在化？、ボトルネック B 発生・継続」
- ・ボトルネック B から渋滞が発生継続する中で、新たにボトルネック A から渋滞が発生する「ボトルネック A：顕在化？、ボトルネック B 発生・継続」
- ・ボトルネック A から延伸する渋滞がボトルネック B まで延伸し「ボトルネック A：定着、ボトルネック B：潜在化」

5.2 各タイプの渋滞発生・定着状況

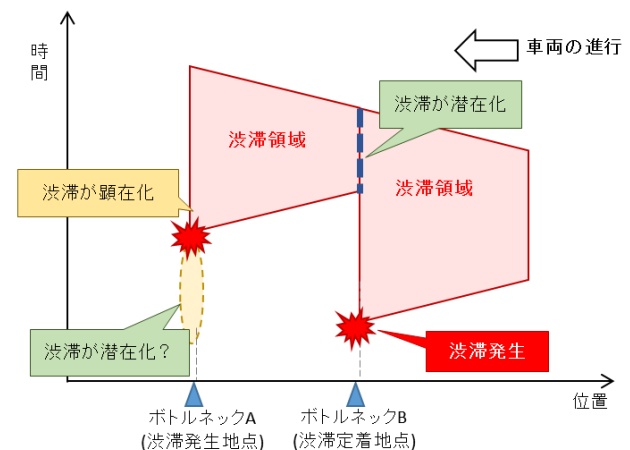
東大阪線下り高井田サグ・下り森之宮入口先頭の渋滞の場合、前記した渋滞の現在化・潜在化の 2 種類のタイプが状況に応じて発生する（図 6）。

ここでは、高井田サグを先頭とした渋滞が森之宮入口を超えて延伸するとき、森之宮入口付近を先頭とするボトルネックの渋滞は潜在化する。

ただし、これらは見かけ上森之宮入口付近を先頭とする渋滞が見えなくなる現象を“潜在”と称しているが、森



(タイプ 1)



(タイプ 2)

図 5 渋滞顕在化・潜在化と定着イメージ

之宮入～高井田出間の区間交通量は顕著には差がみられない（図 7）。おそらく、渋滞の発生は、単なる交通量が「渋滞発生時交通容量」を超過したものと考えられるものの、確率的に発生する渋滞：渋滞発生確率に影響されているのであると思われる。

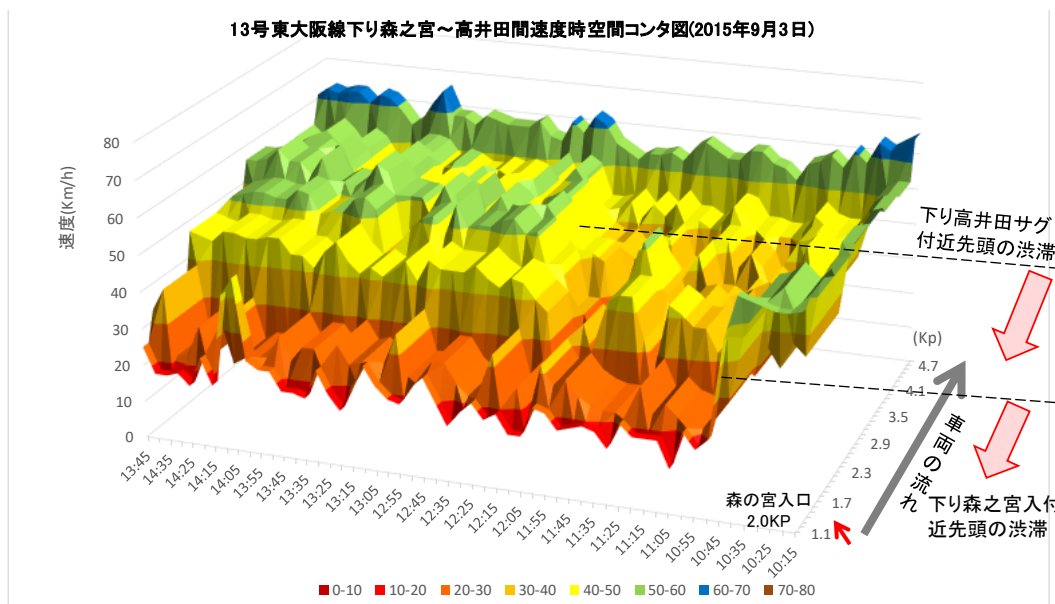
6. おわりに

6.1 まとめ

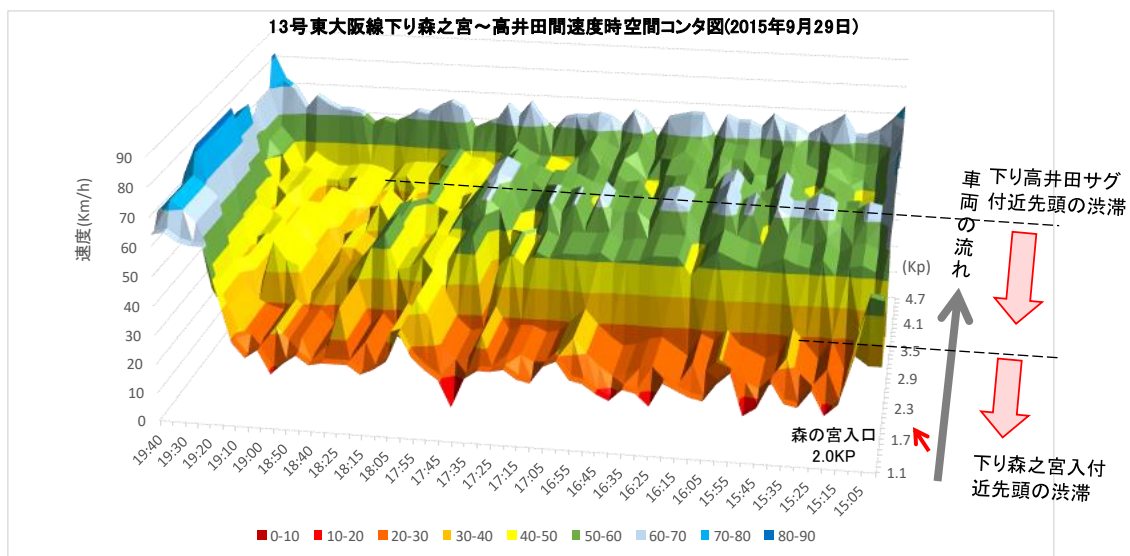
本研究では、複雑な道路構造や交通環境のもとで発生する阪神高速道路の交通集中渋滞について、顕在化・潜在化するボトルネック箇所の特定と処理能力を設定する手法を見出し、車両検知器データに基づく交通状態と、道路線形や構造、その他交通状況に影響を与えると思われる要因との関係について、代表的なボトルネック箇所の渋滞発生メカニズムの見える化を図るとともに、交通渋滞の発生・定着のメカニズムを把握し、容量推定や渋滞発生確率を定量把握する手法の開発を試みた。

本研究で得られた知見と残された課題を取りまとめると、次のとおりである。

- ・渋滞の定義、ボトルネックの定義と分類、ボトルネッ



(タイプ1)



(タイプ2)

図6 東大阪線下り高井田サグ・下り森之宮入口付近の渋滞の潜在・顕在化の例

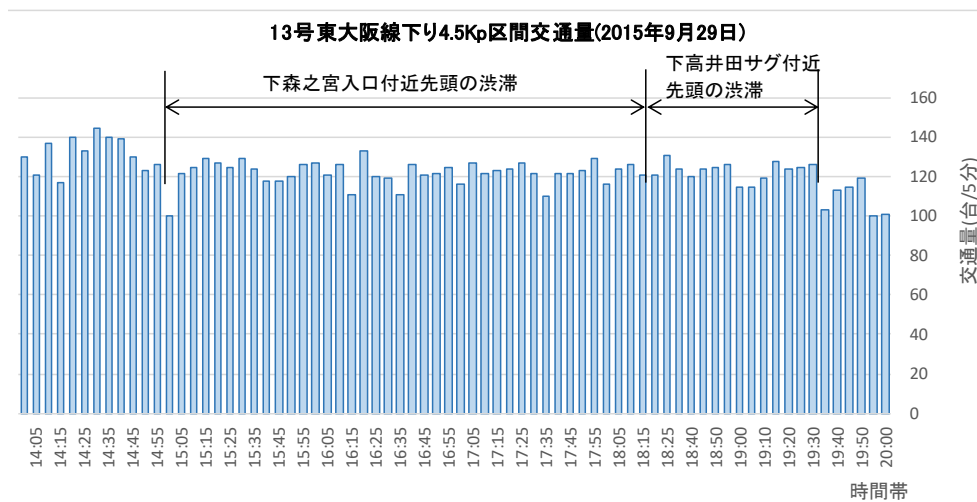


図7 東大阪線下り森之宮入～高井田出区間交通量

ク探索方法を整理するとともに、主要ボトルネック箇所の渋滞の顕在／潜在化する交通状態について、渋滞の発生と定着メカニズムを検討した。

- ・ボトルネックで観測された交通量を用いて観測交通容量の算出と渋滞発生確率分布を推定し、路線系統別ボトルネックにおける渋滞発生確率と観測交通容量（渋滞発生時交通量）、渋滞発生件数及び渋滞時間帯数を当該ボトルネックの0.1Km単位区間の道路構造データと共に見える化を図った。
- ・また、ボトルネックにおける交通容量の変動に影響を及ぼすと考えられる様々な静的・動的説明変数を用いて、重回帰モデルに基づいた交通容量推定モデルを推定し、ボトルネックの交通容量推定を行った。
- ・近接するボトルネックにおいて互いに影響しあう渋滞発生・定着パターンを分類し、渋滞が潜在化・顕在化するメカニズムを整理した。

6.2 今後の課題

今後の課題を整理すると、次のとおりである。

- ・本研究での交通状況は、約500m毎に配置された車両検知器データであり、ボトルネックも「車両検知器区間」という範囲でのみ特定が可能である。このため、「車両検知器区間」内に複数のボトルネック要因が存在する可能性がある場合には、車両検知器データだけではボトルネック要因の特定が困難な場合があることが分かった。
- ・従って、「車両検知器区間」内に複数の要因が存在する場合には、車両挙動が把握できるプローブ情報や画像情報などを活用したより詳細な空間分析が可能な交通データとの連携により、より精緻で信頼性の高いボトルネック特定のための分析を行う必要がある。
- ・分析の結果でボトルネック区間であることはわかったが、今回分析対象とした要因が見いだせない（存在しない）場合があった。すなわち、今回は要因であると考えた情報以外で、交通容量に影響を与える道路構造や交通環境要因がある可能性がある。
- ・本研究で提案した交通容量推定手法を活用すると、新線供用に伴う交通容量の推定はもちろん、新規道路構造に計画交通量を与えることで定量的に渋滞発生の可能性も予測することができ、動的要因を考慮した変動に対する分析も可能である。
- ・道路交通情報分野での活用、交通流シミュレーションにおけるより精緻で動的な容量の反映も可能である。

参考文献

- 1) 越正毅：高速道路のボトルネック容量，土木学会論文集，第371号/IV-5，pp.1-7，1986.
- 2) 越正毅，桑原雅夫，赤羽弘和：高速道路のトンネル，サグにおける渋滞現象に関する研究，土木学会論文集，No.458/4-18，pp.65-71，1993.1.
- 3) 小谷益男，古市朋輝，児島正之，岩崎征人：高速道路単路部における連続的な交通容量推定手法とその有効性，土学会論文集，No.737，IV-60，pp.125-131，2003.
- 4) 吉川良一，塩見康博，吉井稔雄，北村隆一：暫定2車線高速道路のボトルネック交通容量に関する研究，交通工学，Vol.43，No.5，pp.48-58，2008.
- 5) 村重至康，野中康弘，柳沼秀樹：都市間高速道路単路部におけるボトルネック位置の推定手法に関する研究，土木計画学研究・講演集，Vol.40，4pages，2009.
- 6) 村重至康，山口孝，野中康弘：都市間高速道路単路部を対象とした交通容量推定モデルの構築，土木計画学研究・講演集，Vol.42，4pages，2010.
- 7) 村重至康，野中康弘，大口敬：インシデント渋滞解消後における渋滞先頭遡上および定着現象に関する研究，第30回交通工学研究発表会論文集（研究論文），2010.9.