

# 首都圏高速道路網における 渋滞パターンの時空間規則性

酒井 高良<sup>1</sup>・赤松 隆<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生員 東北大学 大学院情報科学研究科人間社会情報科学専攻 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06-408)  
E-mail: takara.sakai.t1@dc.tohoku.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東北大学教授 大学院情報科学研究科人間社会情報科学専攻 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06-408)  
E-mail: akamatsu@plan.civil.tohoku.ac.jp

本研究では、首都圏高速道路網の渋滞パターン(空間分布・推移過程)に規則性が存在することを、長期間観測データに基づき明らかにした。まず、各リンクの渋滞発生状況について独立に分析を行い、渋滞が多発するリンクおよび時間帯が限定されることを示した。次に、時々刻々の渋滞空間分布が年間を通して普遍的ないくつかのタイプに分類可能であることを明らかにした。さらにそれらの渋滞空間分布の日内状態推移パターンについて年間を通して比較し、年間で4パターンに分類可能であることを明らかにした。最後に、これら日内状態推移パターンは日総流入交通量の大小と対応付けられることを示した。

**Key Words:** 渋滞パターン, 空間分布, 推移過程, 長期間観測データ, 高速道路網

## 1. はじめに

高速道路網における交通渋滞は、解決が望まれる問題である。この問題に対し、エリア全域の交通性能を集計的(マクロ)に評価する状態指標 Macroscopic Fundamental Diagram(MFD)<sup>1)</sup> を利用したエリア流入制御手法が提案<sup>2) 3)</sup> されている。しかしながら、エリア内部の混雑レベルに不均質性があるとき、このような制御手法の効率性低下の可能性があることが近年の研究<sup>4) 5)</sup> では指摘されている。そのため、より効率的な制御を行うためには MFD において捨象されていた、よりミクロなエリア内の交通状態情報が必要だと考えられる。そこで本研究ではエリア内の混雑分布(渋滞分布)に着目する。

エリア内の渋滞分布は、MFD において捨象されていたミクロレベルの交通状態を表している。この分布特性を把握することは、効率的な制御手法の構築において重要な課題といえる。このような問題意識から、本研究では渋滞の時空間分布の特性を明らかにする。具体的には、道路網上で毎日、時々刻々実現する渋滞の空間分布およびその推移過程は日々安定しているのか、という観点から、首都圏高速道路網の長期間観測データを対象に分析を行う。

エリアレベルの交通状態に関する実証的な研究としては、Saeedmanesh and Geroliminis<sup>6)</sup> や Rempé<sup>7)</sup> などがある。これらは、渋滞を時空間に広がる現象と捉えてはいるものの、単一の渋滞現象を抽出するという

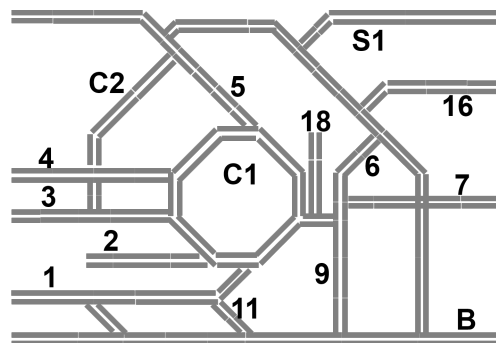


図-1 首都圏高速道路網

表-1 路線一覧

路線記号	路線名	路線記号	路線名
1	1号羽田線	7	7号小松川線
18	1号上野線	9	9号深川線
2	2号目黒線	11	11号台場線
3	3号渋谷線	C1	都心環状線
4	4号新宿線	C2	中央環状線
5	5号池袋線	B	湾岸線
6	6号向島線	S1	川口線

試みに終始しており、渋滞空間分布の特性分析という段階には至っていない。Wen et al.<sup>8)</sup> はエリア全体の渋滞レベルの推移過程に着目した研究であるが、集計的指標を扱っているため、渋滞分布という情報を捨象し

表-2 月別分析対象日数

日数		構成比	日数		構成比
1月	14	9.6%	7月	13	8.9%
2月	14	9.6%	8月	13	8.9%
3月	13	8.9%	9月	10	6.8%
4月	11	7.5%	10月	15	10.3%
5月	7	4.8%	11月	11	7.5%
6月	11	7.5%	12月	14	9.6%
			合計	146	100%

ている。また、これらの研究は小規模なネットワークにおける、短期間の観測データを利用したものが多く、一方、本研究は、(1) 大規模ネットワークにおける長期間観測データに基づき、(2) エリア流入制御への応用を考慮し、(3) 平常時における渋滞の時空間分布の規則性を見出す、という事を念頭に置いており、従来のエリアレベルの交通状態分析とは大きく異なる。

## 2. 分析対象

### (1) 分析対象道路網

本研究では、首都圏高速道路網を分析対象とする。首都圏高速道路網は、1日におよそ100万台の車両が通行する首都圏の経済活動を支える大動脈である。南北におよそ40km、東西におよそ30kmの範囲に、上下線別の総延長およそ400kmの道路網が構築されている。図-1に分析対象である首都圏高速道路網の形状し、表-1に路線の一覧を示す。二つの環状線とそこから放射状に伸びる複数の路線から道路網が構築されている<sup>1</sup>。

本研究では、分析を行うにあたり、実際の道路網上の交通施設をもとに分析ネットワークを構築した。ノードが交通の合流、分岐、流出、流入が伴う箇所(JCT,IC)に対応し、リンクはそれらノード間の道路区間を表している。上記方法で構築した分析ネットワークは、ノード数391、リンク数435となっている。平均リンク長はおよそ994mである。

### (2) 分析対象データ

本研究では、この首都圏高速道路網上のおよそ1500個の感知器による1分刻み24時間の速度・交通量データを対象に分析を行った。観測期間は2014年1月1日から12月31日までの1年間である。

本研究では標準的な状況下の渋滞空間分布の推移を

<sup>1</sup> 本研究で扱う観測データは2014年のものである。その時点で共用が開始されていなかった中央環状品川線については分析対象外としている。また、東京高速道路株式会社が運営するKK線および、それに接続する高速八重洲線、共用区間が極端に短い(1km程度)の首都高10号晴海線については分析対象外とした。

表-3 記号の定義

記号	定義
$d$	日
$D$	分析対象日集合
$t$	時間帯
$\mathcal{T}$	時間帯集合
$i$	リンク
$\mathcal{I}$	リンク集合
$v_{d,t,i}$	時間平均速度 (km/h)
$Q_d$	総流入交通量 (台/日)
$\delta_{d,t,i}$	渋滞状態変数

把握することを目的とする。そのため、1年間365日分の観測データから標準的でない日を除外した。具体的には、悪天候日、休日、長期休暇および大規模な交通規制実施日を分析対象外としている。悪天候日については、気象庁が公開している過去の気象データベースを利用し、東京管区気象台において当該日に1mmでも降雨または降雪があった場合は分析対象外とした。また、当該日が晴天でも積雪がある場合は除外している。休日、長期休暇についてはカレンダー情報を参考にした他、休日の中日も分析対象外としている。これは、飛び石連休も大型連休と判断し、ゴールデンウィークなどの標準的な状況下とは言えない日を除外するためである。さらに、交通事故、火災、要人警護などで道路網全体で大規模な交通規制が実施された日も同様の理由で除外した。これにより分析対象日は年間365日中の146日となった。月別の分析対象日数を表-2に示す。各月の対象日数は7日から15日となっており、概ね年間を通じた普遍的な分析を行えたと考えられる。5月が、他の月と比べ分析対象日数が少ないのはゴールデンウィークの影響である。

### (3) 記号の定義

本稿で扱う記号の定義を表-3に示す。分析対象日集合を $D$ 、時間帯集合を $\mathcal{T}$ 、リンク集合を $\mathcal{I}$ とし、 $d$ 日の時間帯 $t$ にリンク $i$ で観測された時間平均速度を $v_{d,t,i}$ とし、 $d$ 日の総流入交通量を $Q_d$ とする。総流入交通量とは、一般道から対象高速道路網への流入交通量(ICからの流入交通量)に、接続高速道路<sup>2</sup>からの流入交通量を加えたの合計である。分析対象日数は $D = 146$ であり、リンク数は $I = 453$ となっている。時間帯数 $\mathcal{T}$ については分析の際に調節を行ったため、その数については適宜述べる。

<sup>2</sup> 首都圏高速道路網は、東北自動車道、中央自動車道など9本の路線と接続している。

### 3. 予備分析

本章では、渋滞の判定方法および、基本分析として各リンクを独立に分析した結果について示す。

#### (1) 渋滞状態の判定方法

まず、渋滞現象の分析を行うにあたり、時々刻々の各リンクの交通状態状態を判定する基準を設けた。大口・中村<sup>9)</sup>では、交通渋滞を「交通容量上のボトルネックに、その地点の交通容量を超える交通需要が流入したとき、ボトルネックを通過できずにここを先頭として上流に滞留した車両列の交通状態」と定義している。一般に、感知器データのみでこのような状態を厳密に把握することは困難である。そこで今回は、各リンクの時々刻々の時間平均速度  $v_{d,t,i}$  に着目した。信号のない高速道路網<sup>3)</sup>においては、速度の低下をそのまま渋滞と判定しても差し支えないと考えられる。

このことを踏まえて各リンクの渋滞状態については、閾値となる渋滞判定速度  $v^*$  を設定し、以下のように二値変数 (渋滞/非渋滞) として定義した。

$$\delta_{d,t,i} = \begin{cases} 1 & \text{if } (v_{d,t,i} < v^*) \\ 0 & \text{if } (v_{d,t,i} \geq v^*) \end{cases} \quad (1)$$

観測データは 1 分刻みであるが、分析結果の頑健性を高めるために様々な時間幅に集計し、分析を行った。本稿では紙面の都合上、渋滞判定速度  $v^* = 20\text{km/h}$ 、時間幅  $dt = 10$  分の場合についてのみ議論する<sup>4)</sup>。

#### (2) 分析結果

次に、渋滞状態変数を用いて、リンクごとに独立に基本分析を行った。リンク数が非常に多いため、分析結果より得られた各リンクの特徴付けについては本稿では割愛する。そのため、本節では基本分析の方法と得られた知見について、簡単に述べる。詳細な分析結果については、酒井<sup>10)</sup>に詳しい。

基本分析として、(1) 各リンクにおいて 1 日の中で渋滞状態にある時間の合計 (日渋滞時間)、(2) エリア全体の時間帯別渋滞リンク数、(3) リンクペアごとの渋滞同時発生率を算出した。日渋滞時間  $JT^{d,i}$  および時間帯別渋滞リンク数  $JI^{d,t}$  は以下の定義式より算出した。

$$JT^{d,i} = dt \times \sum_{t \in \mathcal{T}} \delta_{d,t,i} \quad (2)$$

$$JI^{d,t} = \sum_{i \in \mathcal{I}} \delta_{d,t,i} \quad (3)$$

渋滞同時発生率  $s_{i,j}$  を以下のように定義し、すべての

リンクペアについて算出した。

$$s_{i,j} = \frac{\sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \delta_{d,t,i} \delta_{d,t,j}}{A_i + A_j, \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \delta_{d,t,i} \delta_{d,t,j}} \quad (4)$$

ここで、 $A_i = \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \delta_{d,t,i}$  である。

これらの分析より、以下に述べる知見が得られた。

- 年間を通して渋滞が発生しやすいリンクは限定的である。
- エリア全体で渋滞が多発する時間帯は限定的である。
- 渋滞同時発生率の大きい共起リンクペアが存在する。

これらは、「夕方になるといつも、あの区間は渋滞している」などの利用者目線の直感と矛盾がない結果であり、交通状態の定常性を議論した種々の研究においても指摘されていたことである。興味深いのは、最後の渋滞同時発生率に関する知見である。得られた共起リンクペアに着目すると、多くの共起ペアは隣接リンク同士であるが、その他に構造上は接続関係のないリンクペアについても渋滞が同時に発生するケースが多数存在した。これらのことを踏まえて、時々刻々の渋滞空間分布についても、少数の典型的なタイプに“限定”されると考え以降の分析を行った。

### 4. 渋滞空間分布の分析

本章では、基本分析の結果を踏まえて、渋滞空間分布について分析を行った結果について示す。

#### (1) 渋滞空間分布の分類方法

まず、分析対象となる時々刻々の渋滞空間分布をベクトルとして記述した。d 日、時間帯 t における道路網の渋滞空間分布  $\Delta_{d,t}$  を以下のように定義する。

$$\Delta_{d,t} = [\delta_{d,t,1}, \delta_{d,t,2}, \dots, \delta_{d,t,I}]^T \quad d \in \mathcal{D}, t \in \mathcal{T} \quad (5)$$

これら 1 年分の時々刻々の渋滞空間分布ベクトル<sup>5)</sup>をクラスタリング手法 (k-means 法)<sup>6)</sup> をよって分類した。

#### (2) 渋滞空間分布の分類結果

分類の結果、時々刻々の渋滞空間分布は 8 つのタイプに分類可能であることが明らかとなった<sup>7)</sup>。表-4 に各タイプの年間出現日数を示している。どのタイプも年間を通して普遍的に出現することが確認できる。各タイプの道路網上での渋滞発生状況を図-2 に示す。各図において赤矢印が渋滞リンク<sup>8)</sup>を表し、矢印の方向は当該

<sup>5)</sup> 分類対象のベクトルの本数は、1 日の時間帯数  $T = 144$  と分析対象日数  $D = 146$  の積であるので、21040 となる。

<sup>6)</sup> k-means 法の詳細については付録に示す。

<sup>7)</sup> k-means 法の分類数についても調整を行った (付録参照)。その結果、いずれの場合にも以降で述べる結論が概ね変わらないことを確認した。本稿では分類数 8 の場合について特に議論する。

<sup>8)</sup> 視認性向上のため、ある程度リンクをまとめて表現している。そのため分析ネットワークとはリンク数が異なっている。

<sup>3)</sup> 本研究では、分析対象外としている範囲ではあるが、首都圏高速道路網内にごくわずかに信号は存在する。

<sup>4)</sup> 渋滞判定速度を 20, 30, 40km/h、時間幅を 1, 5, 10, 15 分幅とした場合でも、後述する結論が変わらないことを確認している。

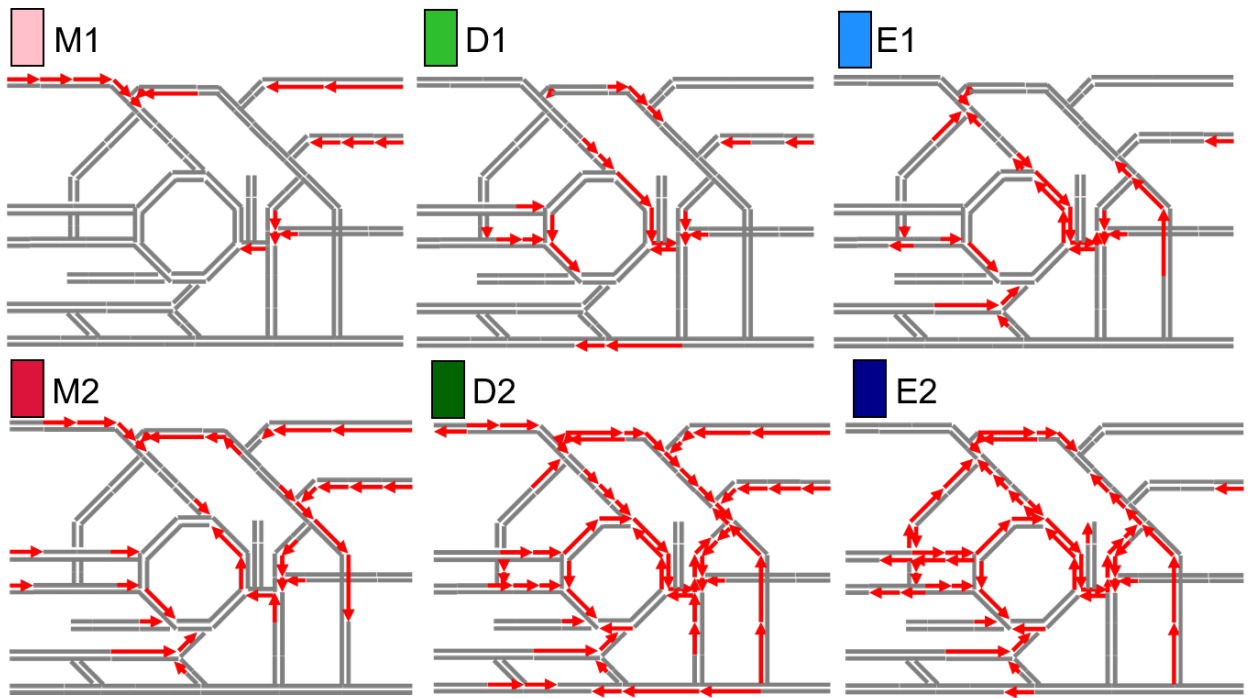


図-2 渋滞空間分布タイプ

表-4 渋滞空間分布タイプの出現日数

N1	N2	M1	M2	D1	D2	E1	E2
146	146	146	144	128	85	145	106

路線の進行方向を示している。図-2において下段の3タイプ(M2, D2, E2)は、上段の3タイプ(M1, D1, E1)に比べてよちネットワーク全体として混雑していることが読み取れる。なお、これらの他の2つのタイプ(N1, N2)は、ほとんど渋滞が発生していない状況であった。

これらの渋滞空間分布タイプの時系列の出現状況を図-3で示している。この図は、メッシュ構造(横軸:日付, 縦軸:時間帯)となっており、各セルの色が時々刻々の渋滞空間分布のタイプを表している(配色は表-4と対応)。図より、時間帯によって出現するタイプが限定されることがわかる。例えば、朝時間帯(Morning)ではM1, M2タイプが出現し、昼時間帯(Daytime)にはD1, D2タイプ、夕時間帯(Evening)にはE1, E2タイプが多く出現している。これは、時間帯によって交通需要パターンが異なることにより、道路網上で実現する交通状態にも違いが生じた結果と言える。

これらのことより、各時間帯によって、潜在的に渋滞が発生しやすいリンクは異なり、需要レベルに応じて実際の渋滞発生の有無が決定されると考えた。さらに、各タイプの出現時間帯が限定されることにより、タイ

プの出現順序(状態推移)にも規則性を見出すことができる。次章では、このような1日の中での状態推移過程に着目して分析を行った結果について示す。

## 5. 渋滞空間分布の日内状態推移

渋滞空間分布が1日の中で時間とともに変化していく過程を“日内状態推移”と呼び、本章ではその分析結果について示す。

### (1) 日内状態推移の分類方法

まず、1日の中の各時間帯に実現している渋滞空間分布を、前章の8タイプ(N1からE2)で記述し以下のように日内状態推移  $\mathbf{X}_d$  を表した<sup>9</sup>。

$$\mathbf{X}_d = [x_1, \dots, x_t, \dots, x_T]^T \quad (6)$$

$$x_t \in \{N1, \dots, E2\}$$

この  $\mathbf{X}_d$  は、図-3において縦方向に1日分のデータを取り出してきたものと簡単に解釈することができる。次に、渋滞空間分布の推移過程について年間を通した比較するため、各日における日内状態推移  $\mathbf{X}_d$  をクラスタリング手法を再度用いて分類した。クラスタリングには、渋滞空間分布の分類の際と同様に k-means 法を用いた。

<sup>9</sup> 厳密には、ある渋滞空間分布タイプが連続して出現した場合に、当該時間帯においてそのタイプが出現したと判断している。



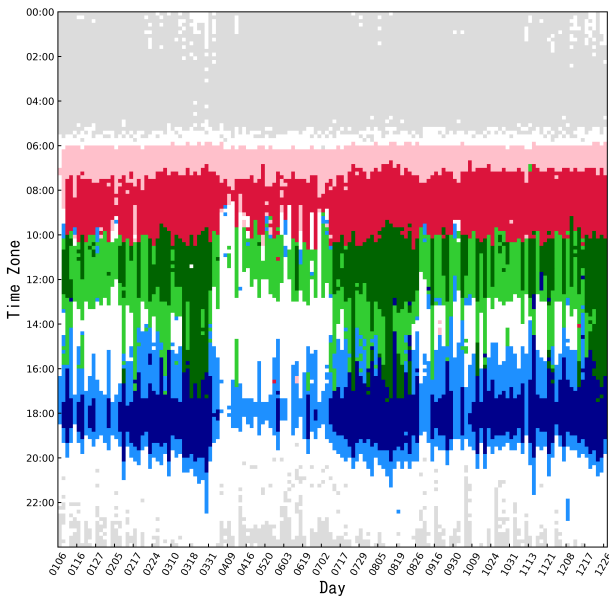


図-3 渋滞空間分布の出現状況

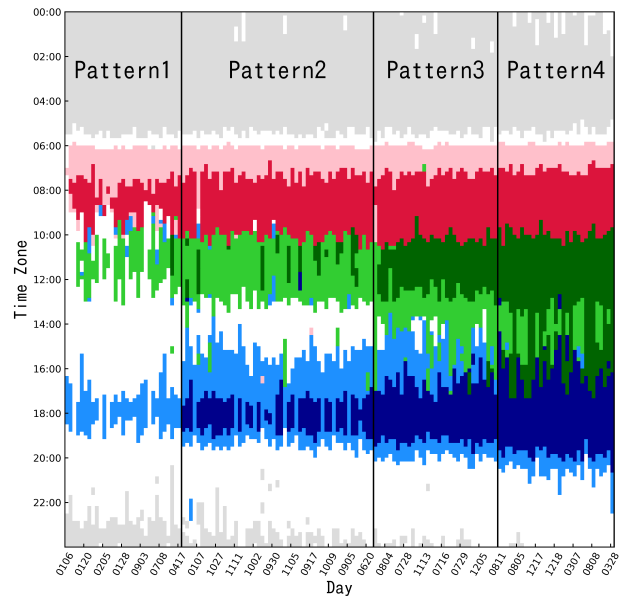


図-4 日内状態推移パターン

(2) 日内状態推移の分類結果

分類結果を図-4に示す。図-4は、図-3を分類パターンごとに各日の日内状態推移を横軸方向に並べ変えたものとなっている。図中の黒線を境界として、各パターンを区別している。縦軸が日内時間軸をとっていることに変わりはないが、横軸の日付が、年間時系列にはなっていないことに注意されたい。図より、各パターンごとに、8タイプの出現順序が異なっていることがわかる。各パターンの6時頃から20時頃までの渋滞空間分布の出現順序は以下のように解釈可能である。

- パターン 1: M1-M2-D1-N2-E1
- パターン 2: M1-M2-D1-N2-E1-E2-E1
- パターン 3: M1-M2-D2-D1-N2-E1-E2-E1
- パターン 4: M1-M2-D2-E2-E1

このような出現順序に着目して、図-4をより模式的に表現したものが図-5である。この図は日内の時間軸を円上にとっており、同一半径の円周上を時計周りに辿ることで、渋滞空間分布の状態推移過程を把握することができる。これより、出現順序の規則性を改めて確認することができる。具体的には、朝時間帯に年間を通してほぼ確定的にM1,M2タイプへの状態推移があることが読み取れる。また昼時間帯、夕時間帯においても、出現順序に規則性を見出すことができる。例えば、E2タイプが出現する前後では、ほとんどの場合E1タイプが出現していることが挙げられる。これは、夕時間帯の交通需要のピークに至る過程と、その解消過程を反映していると考えられる。

これらのことより、出現順序の規則性(状態推移パ

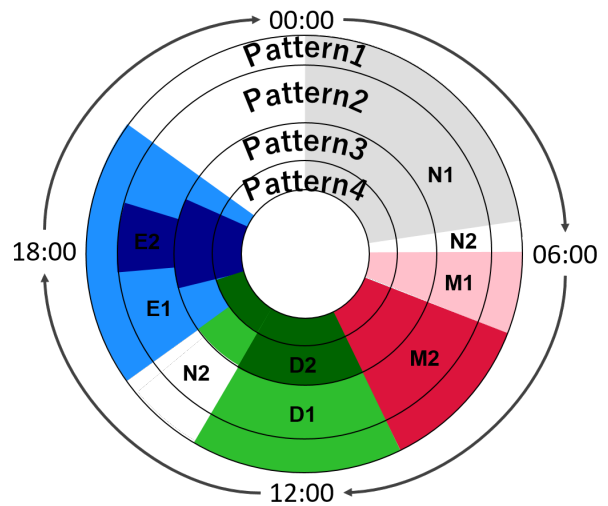


図-5 日内状態推移パターンの模式図

ターン)を生みだすものとして、交通需要の大小に着目した分析を行った結果について次章で示す。

6. 日内状態推移パターンと日総流入交通量の対応関係

年間を通していくつかの日内状態推移パターンが存在することが明らかとなった。ここでは、混雑レベルに大きく影響を与える需要条件と渋滞空間分布との関係性について分析を行った結果について示す。

具体的には、日内状態推移パターンと日総流入交通量

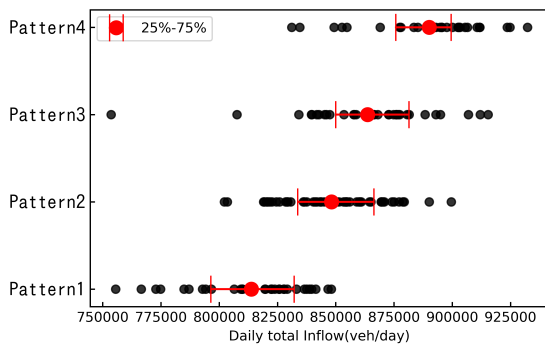


図-6 日内状態推移パターンと交通量

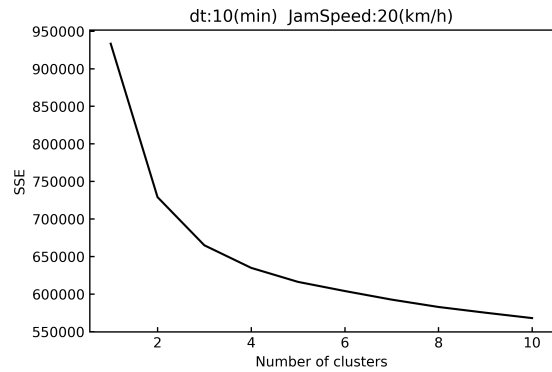


図-7 クラスタ数と残差平方和の関係

との対応付けを行った。図-6に結果を示す。図は、分析対象日数 146 日分の(日総流入交通量, 日内状態推移パターン)ペアをプロットしたものである。横軸は総流入交通量(台/日)を表し、縦軸は当該日の日内状態推移パターンを表している。また、同一パターンの日において交通量上位 25% から 75% の四分位範囲を赤線で示している。これより、日総流入交通量の大小に応じて、当該日に実現する日内状態推移パターンが限定されることがわかる。

日総流入交通量は 1 日の交通需要を表し、渋滞空間分布およびその日内状態推移は交通現象を表現していると考えられる。需要条件とその結果生じる交通現象という観点で、両者が対応付けられることが明らかとなった。

## 7. おわりに

本研究では、エリア内の混雑分布に着目し、大規模ネットワークにおける長期間観測データに基づいて分析を行い、首都圏高速道路網における渋滞の時空間分布に規則性が存在することを明らかにした。具体的にはまず、時々刻々道路網上で実現している渋滞空間分布の分類を行い、年間を通して普遍的な渋滞空間分布が存在することを明らかにした。次に、それら渋滞空間分布の日内状態推移についても分類を行い、年間を通して 4 パターンに分類可能であることを示した。最後に、それら日内状態推移パターンが日総流入交通量の大小と対応することを示し、需要条件とその結果生じる交通現象の関係性を実証的に示した。

MFD では捨象していた混雑分布情報を持った渋滞空間分布に規則性が存在することを示したことは、より効率的なエリア流入制御手法の構築という観点で意義深いといえる。しかしながら、そのような規則性がなぜ成立するのかという点に対しては、本研究では集計的な日総流入交通量との対応付けをするにとどまっている。王ら<sup>5)</sup>は、仙台市および京都市の交通データを利

用して Macroscopic Fundamental Diagram(MFD) と渋滞空間分布の対応関係を実証的に示しており、Wada et al.<sup>11)</sup> では渋滞空間分布とネットワーク性能を表すトリップ完了率の関係を DUE 逆問題として定式化している。このように交通状態変数間の対応を把握することは、制御モデルに入力・出力変数の関係性を知ることになるので、非常に重要である。そのため、今後の課題としては時々刻々の渋滞空間分布およびその状態推移過程と MFD との関係性をより詳細に明らかにすることが挙げられる。これにより、従来の MFD のみを利用したエリア流入制御手法を発展させ、より効率的かつ頑健な制御手法の構築に寄与することが期待できる。

## 付録 I k-means 法

本研究では、時々刻々の渋滞空間分布の分類およびその日内状態推移の分類と 2 回、k-means 法を用いて分析を行った。本章では元田ら<sup>12)</sup>を参考にし、一般的な k-means 法について述べる。

$D$  次元ユークリッド空間上のデータ集合  $\{\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N\}$  をを  $K$  個のクラスターに分割(分類)することを考える。このとき、各データ  $\mathbf{x}$  が  $K$  個のクラスターのいずれに属するのかわを示す、2 値変数  $r_{nk} \in \{0, 1\} (k = 1, \dots, K)$  を定める。データ点  $\mathbf{x}$  がクラスター  $k$  に割り当てられている場合に  $r_{nk} = 1$  となり  $j \neq k$  の場合に  $r_{nj} = 0$  となる。データ集合を  $K$  個のクラスターに分割することは、以下の目的関数  $J$  を最小にすることで実現される。

$$J = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K r_{nk} \|\mathbf{x}_n - \mu_k\|^2 \quad (I.1)$$

## 付録 II k-means 法におけるクラスタ数

## (1) クラスタリング残差

一般に k-means 法において最適なクラスタ数 (分類数) を決定する手法は確立されていない. このような問題への簡単な対処法としてエルボー図を用いる方法がある. エルボー図とは, クラスタ数  $K$  と残差平方和  $SSE(K)$  (sum of squared errors of prediction) の関係を示したグラフである. 残差平方和  $SSE(K)$  は, 付録 I で用いた記号を利用すると以下ようになる.

$$SSE(K) = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K r_{nk} \|x_n - \mu_k\|^2 \quad (\text{II.1})$$

ここで右辺は k-means 法の目的関数  $J$  と全く同じであるが, クラスタの中心ベクトル  $\mu_k$  がすでに最適化されていることに注意されたい. つまり, 各クラスタの中心ベクトルとそのクラスタに属するベクトルとの距離の二乗和を意味している. クラスタ数  $K$  を変化させたときに残差平方和  $SSE(K)$  がどれだけ変化するかによって, クラスタ数の最適性を議論することができる.

## (2) クラスタ数の調整

本節では, 渋滞空間分布の分類の際に, クラスタ数 (分類数) を調整してクラスタリングを行った結果について示す. クラスタ数  $K$  については, 1 から 10 に設定しクラスタリングを行った. クラスタ数  $K$  と残差平方和  $SSE(K)$  の関係 (エルボー図) を図-7 に示す. クラスタリング対象の渋滞空間分布ベクトル  $\Delta_{d,t}$  の各要素は二値のブールデータであるので,  $SSE(K)$  の絶対値については特に意味を持たないことに注意されたい. そのため, ここで参考とするのはその大小関係および変化分の大きさである. 概ね, クラスタ数 5 以降は  $SSE(K)$  の変化分が小さくなる. つまり, これ以上クラスタ数を増やしてもクラスタリング精度向上への寄与が小さい.

謝辞: 本研究を進めるにあたり, 首都高速道路株式会社, 日本道路交通情報センター (JRTIC) より貴重なデータをご提供いただきました. また, 本研究は, 日本学術振興会・科学研究費補助金・基盤研究 (B) (課題番号: 18H01551) の助成を受けた研究の一部です. ここに記し, 感謝を表します.

## 参考文献

- 1) Daganzo, C. F.: Urban gridlock: Macroscopic modeling and mitigation approaches, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.41, No.1, pp.49–62, 2007.
- 2) Geroliminis, N., Haddad, J., and Ramezani, M.: Optimal perimeter control for two urban regions with macroscopic fundamental diagrams: A model predictive approach, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.14, No.1, pp.348–359, 2013.
- 3) Keyvan-Ekbatani, M., Kouvelas, A., Papamichail, I., and Papageorgiou, M.: Exploiting the fundamental diagram of urban networks for feedback-based gating, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.46, No.10, pp.1393–1403, 2012.
- 4) Geroliminis, N. and Daganzo, C. F.: Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.42, No.9, pp.759–770, 2008.
- 5) 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*, Vol.2, No.5, pp.11–20, 2016.
- 6) Saeedmanesh, M. and Geroliminis, N.: Dynamic clustering and propagation of congestion in heterogeneously congested urban traffic networks, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.105, pp.193–211, 2017.
- 7) Rempe, F., Huber, G., and Bogenberger, K.: Spatio-temporal congestion patterns in urban traffic networks, *Transportation Research Procedia*, Vol.15, pp.513–524, 2016.
- 8) Wen, H., Sun, J., and Zhang, X.: Study on traffic congestion patterns of large city in china taking beijing as an example, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Vol.138, pp.482–491, 2014.
- 9) 大口敬, 中村英樹: 日本における交通容量・サービスの質に関する研究の概観と展望, *土木学会論文集 D3 (土木計画学)*, Vol.67, No.3, pp.217–229, 2011.
- 10) 酒井高良: 首都圏高速道路網における渋滞パターンの時空間規則性, *東北大学工学部建築社会環境工学科卒業論文*, 2018.
- 11) Wada, K., Satsukawa, K., Smith, M., and Akamatsu, T.: Network throughput under dynamic user equilibrium: Queue spillback, paradox and traffic control, *Transportation Research Part B: Methodological*, 2018, in press.
- 12) 元田浩, 栗田多喜夫, 樋口知之, 松本裕治, 村田昇など: *パターン認識と機械学習*, Vol. 3, Springer, 2008.

(2018. 4. 27 受付)

Spatio-temporal Regularities of Traffic Congestion Patterns  
in Metropolitan Expressway Network

Takara SAKAI and Takashi AKAMATSU