



# 首都圏高速道路網における 経路選択パターンの規則性

第59回土木計画学研究発表会・春大会

2019年6月9日@名城大学

石川 裕太郎, 酒井 高良, 赤松 隆

(東北大學 大學院情報科学研究所)

# 研究の背景

## ❖ 道路網における利用者の経路選択行動分析

- 円滑かつ快適な道路交通計画に必要不可欠な作業
- 様々な理論モデル・観測データを利用したパラメータ推定手法

## ❖ 利用者の行動原理の日々の規則性

- 人々の行動パターンは日毎に大きく変化しない(e.g. 通勤行動)
- 日々出現する渋滞パターンの規則性(酒井・赤松(2019))
  - i.e. Supplyサイドの規則性○ ⇔ Demandサイドの規則性…?

## ❖ 従来研究

- **長期間かつ日内の詳細な観測データ**に基づく **dynamic** な実証分析
  - ほとんど存在せず
  - 対象ネットワークや車両、期間を限定した研究にとどまる
- 経路選択行動パターン(i.e. 行動原理)の安定性/規則性が未解明
  - 経路選択モデル・パラメータの**時間移転可能性**が未検証

# 研究の目的

## ❖ 目的

大規模道路網における長期間かつ詳細な観測データから  
利用者の経路選択パターンの変動特性を解明する

## ❖ アプローチ

1. 動的な経路選択行動モデル・パラメータの最尤推定
2. パラメータの変動特性検証

### 分析の枠組み

#### 観測データ@感知器

① リンク交通量

② リンク交通費用(旅行時間)

#### Supplyサイド

##### 予見

ネットワークの  
全リンクコスト

#### Demandサイド

##### 分析対象

利用者の  
経路選択モデル・  
パラメータ

## ❖ 発表の構成

動的な  
パラメータ推定手法

分析対象  
ネットワーク

推定結果の  
整理と解釈

# 経路選択モデルと静的なパラメータの最尤推定

## ◆経路選択行動モデル: ロジット・モデルを仮定

ODペア  $rs$  間の経路  $k$  の  
経路選択確率

$$P_k^{rs} = \frac{\exp(-\theta c_k^{rs})}{\sum_k \exp(-\theta c_k^{rs})}$$

パラメータ 経路交通費用

$\theta$ : 利用者の交通費用に対する  
感度パラメータ  
 $\theta \rightarrow$  大: 確定的行動  
 $\theta \rightarrow$  小: 確率的行動

## ◆最尤推定法による静的なパラメータ推計(Robillard(1974))

➤ 尤度関数:

$$s(\theta) = \prod_k (P_k^{rs})^{f_k^{rs}}$$

経路交通量

➤ 最尤方程式(観測データにあわせ、リンク変数ベースで定式化):

最尤推定量      モデルに基づく配分結果から  
算出される総交通費用

$$f(\hat{\theta}) = \sum_i c_i x_i(\theta) - \sum_j c_j \tilde{x}_j = 0$$

$x_i$ : リンク  $i$  の配分交通量  
 $\tilde{x}_i$ : リンク  $i$  の観測交通量  
 $c_i$ : リンク  $i$  のリンク旅行時間

観測された総交通費用

# 動的なパラメータの最尤推定

## ❖ 最尤推定法による動的なパラメータ推計

- 最尤方程式を時間変化を考慮したものに拡張

|                              |   |                                      |
|------------------------------|---|--------------------------------------|
| 時間帯 $\mathcal{T}$ の<br>最尤推定量 | モデルに基づく配分結果から<br>算出される総交通費用   | 時間帯 $\mathcal{T}$ において<br>観測された総交通費用 |
|                              | $f(\hat{\theta}(\mathcal{T})) = \sum_{i \in \mathcal{N}_3} \sum_{t \in \mathcal{T}} c_i(t) x_i(t   \theta) - \sum_{j \in \mathcal{N}_3} \sum_{t \in \mathcal{T}} c_j(t) \tilde{x}_j(t)$ |                                      |

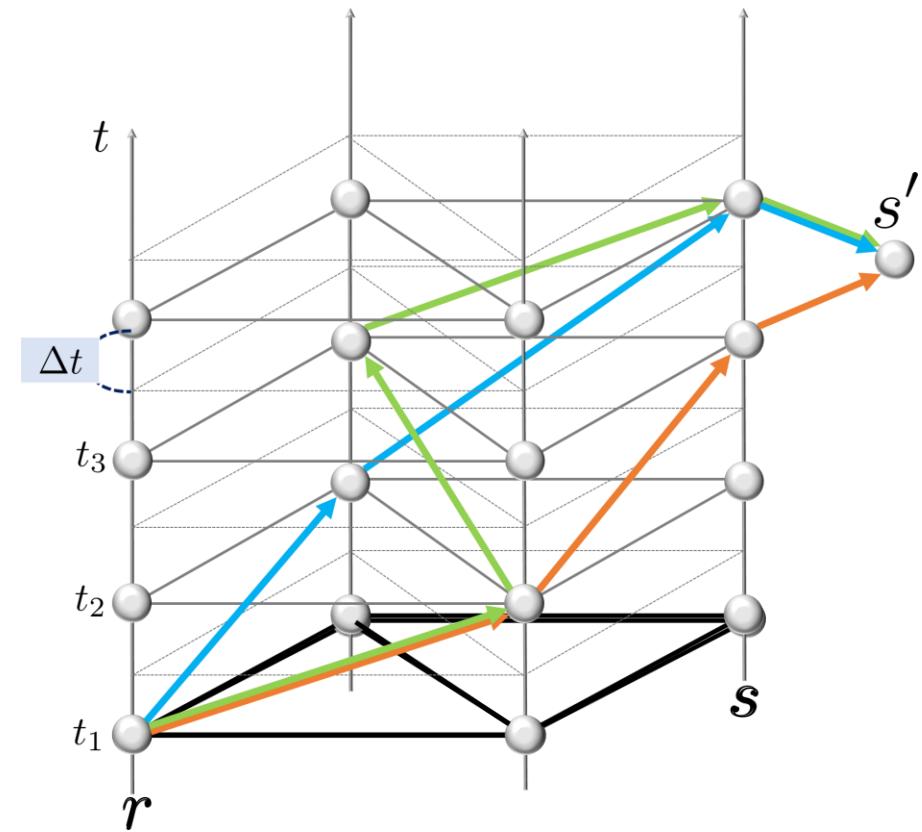
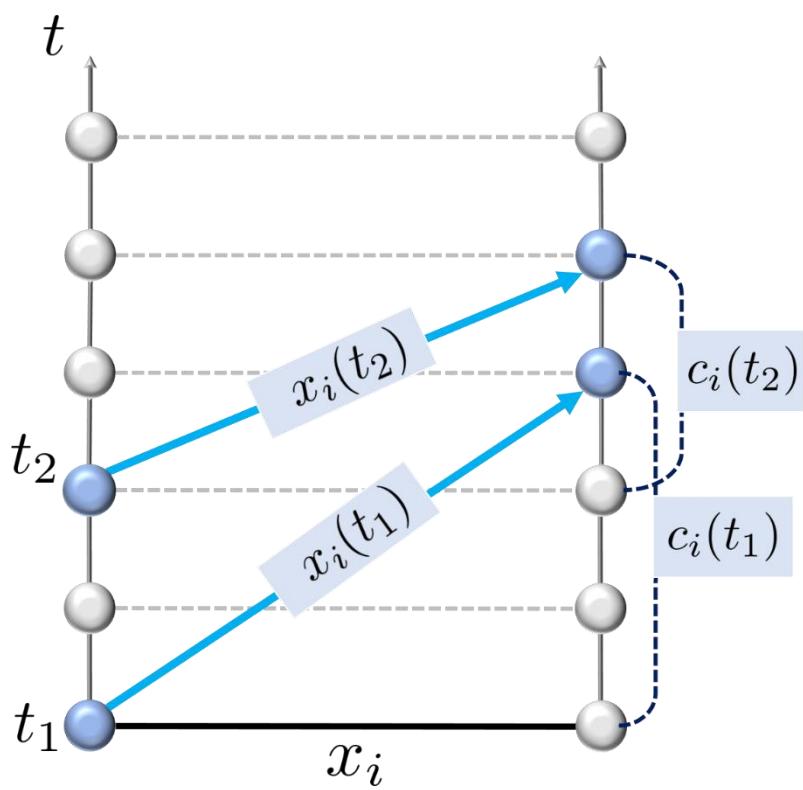
時刻  $t$ , リンク  $i$  の観測交通量, 交通費用(旅行時間)

- リンクで観測されたデータは  $\tilde{x}_j(t), c_i(t)$  に対応
- **動的な交通量配分による時々刻々のリンク交通量  $x_i(t | \theta)$  が必要**
- Supply側の条件を固定 → ***Flow Independent*** なネットワーク
- 時空間ネットワークの活用
  - 動的な交通量配分を静的枠組みで取扱い可能

# 動的な交通量配分の枠組み

## ❖ 時空間ネットワークを利用した動的な交通量配分

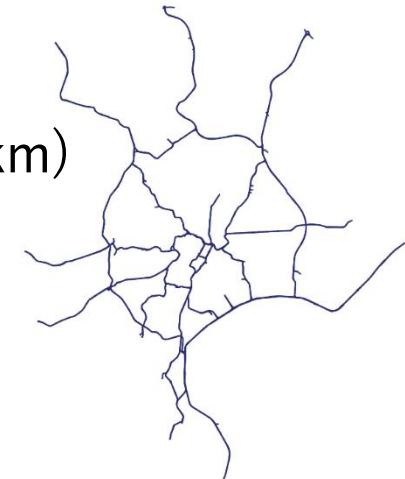
- 2次元ネットワークに時間軸を加えた3次元ネットワーク
- Dial配分法: ロジット・モデルと等価なリンク交通量配分



# 分析対象のネットワークと交通データ

## ❖ ネットワーク

- 首都圏高速道路網(22路線・上下線別総延長約400km)
- 分析用に2次元ネットワークで表現
  - ノード数287, リンク数333, ODペア数11823



## ❖ 交通データ

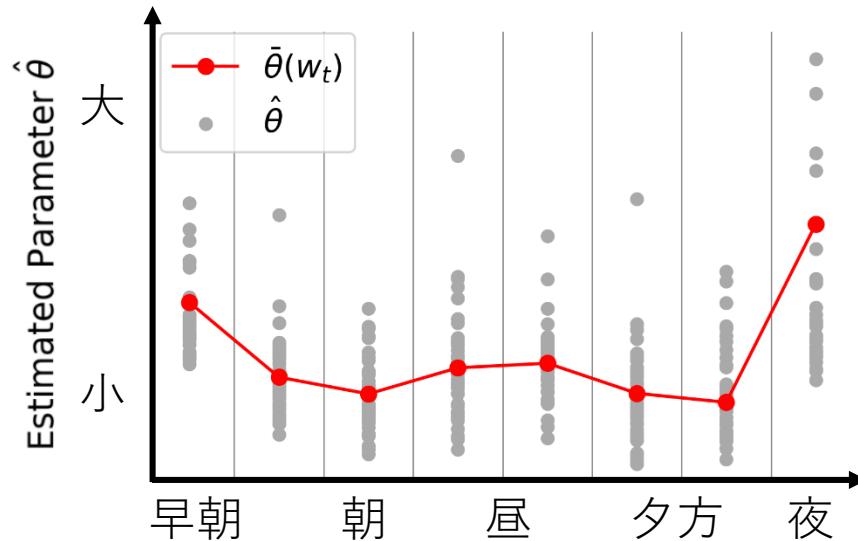
- 観測期間: 24時間, 365日, 1分間隔(2014/1/1-12/31)
- 観測量: 約1500個の感知器における**交通量データ, 速度データ**  
**リンクにおける観測交通量  $x_i$ , 交通費用(旅行時間)  $c_i$  に対応**
- OD交通量: 二重制約エントロピーモデルで推計(約5万台/hour)

## ❖ 具体的なパラメータ推計の条件

- 推計対象日: 晴天かつ平日である代表的な40日
- 推計時間帯: 6時~22時まで, **2時間刻み**(日内8時間帯)

# パラメータ推定結果: 時間帯別

❖ パラメータの全推定結果を時間帯別にプロット



$\theta \rightarrow$  大: 確定的行動  
 $\theta \rightarrow$  小: 確率的行動

❖ 時間帯ごとの推定値の比較

- 混雑がそこまで発生しない時間帯(早朝, 深夜): 推定値 大
- 一般に混雑が発生しやすい時間帯(Rush hour): 推定値 小

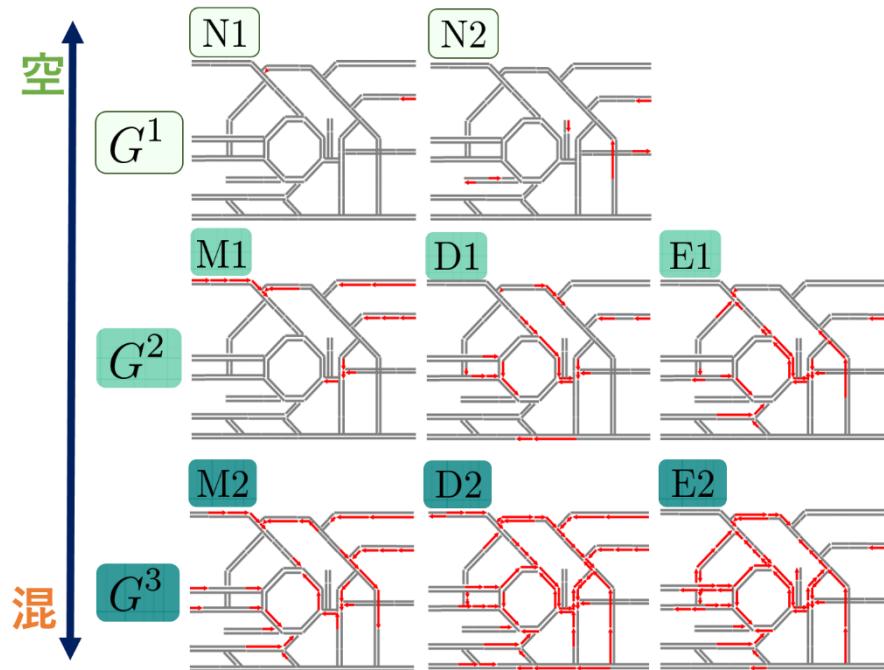
混雑レベルとパラメータの大小に **対応関係** が存在？

## ◆同一の道路網における渋滞パターンの分析

- 混雑に関する3つの規則性が解明
- パラメータの推定値と混雑状況の対応関係把握に活用

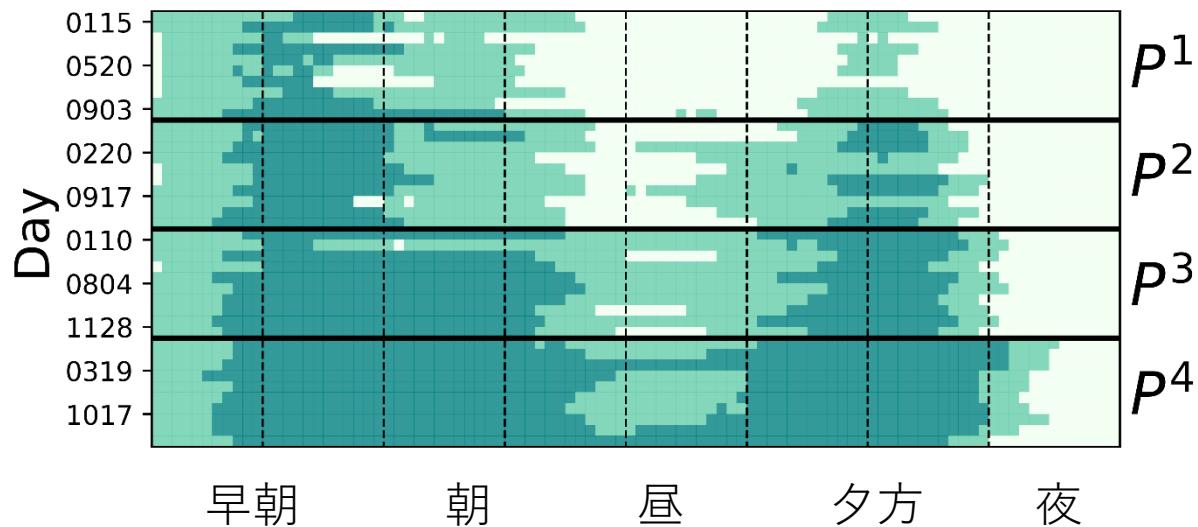
## 1. 道路網上の混雑分布：8つの混雑空間分布タイプに分類

- 各タイプは道路網の混雑レベルの違いを反映
- 8つのタイプを混雑レベルに応じ  $G^1$   $G^2$   $G^3$  に分類



## 2. 混雑空間分布の日内推移：4つの混雑推移パターンに分類

- 同じパターンの日は混雑レベルが規則的に変化

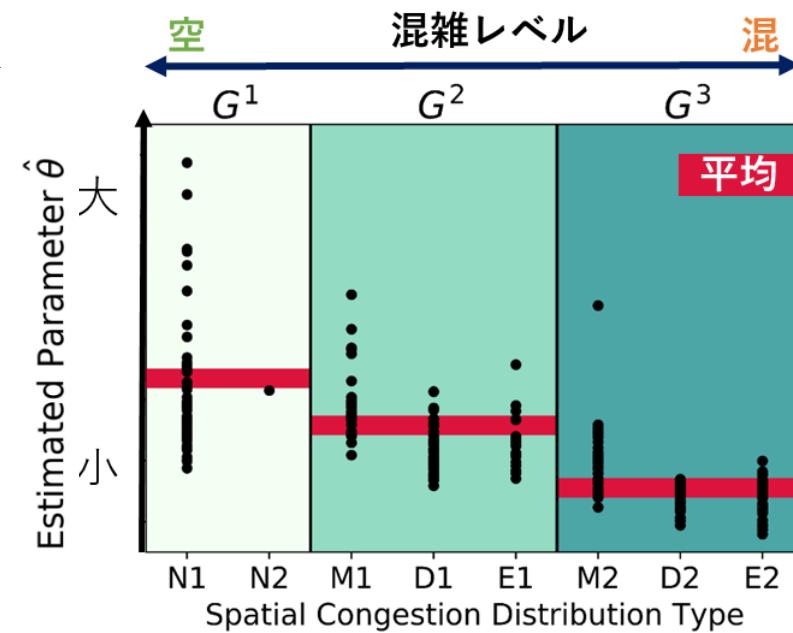
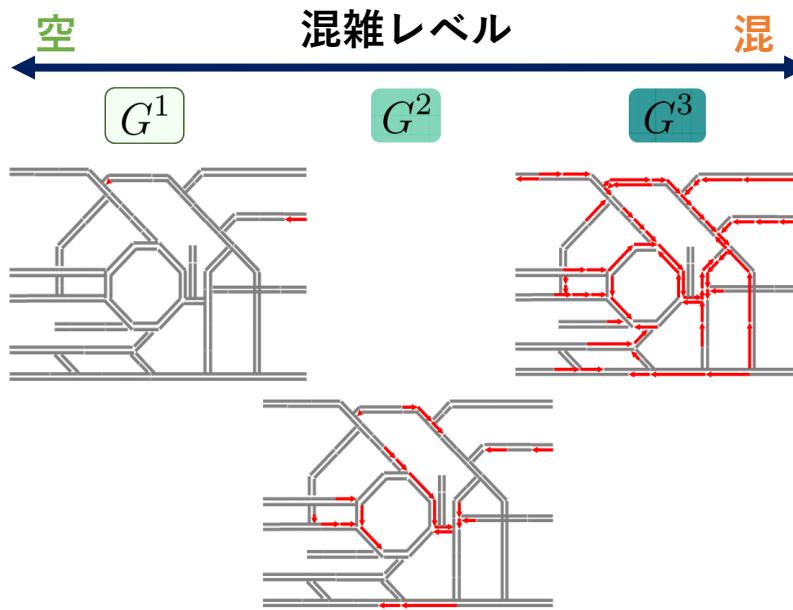


## 3. 混雑推移パターン：日々の混雑レベルの違いに対応

- 混雑の激しさ： $P^4 > P^3 > P^2 > P^1$

# パラメータ推定結果: 道路網の混雑との対応

❖ 時々刻々の混雑空間分布に応じて推定値(320個)を分類



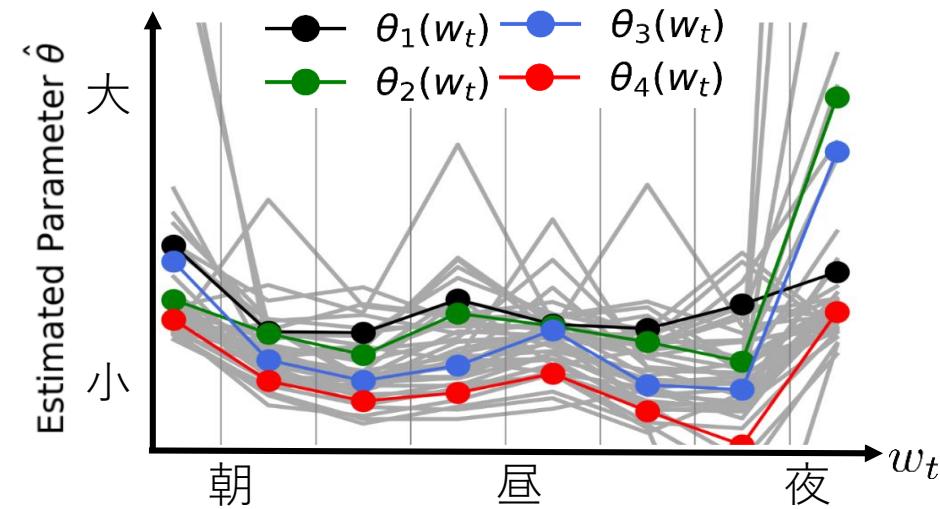
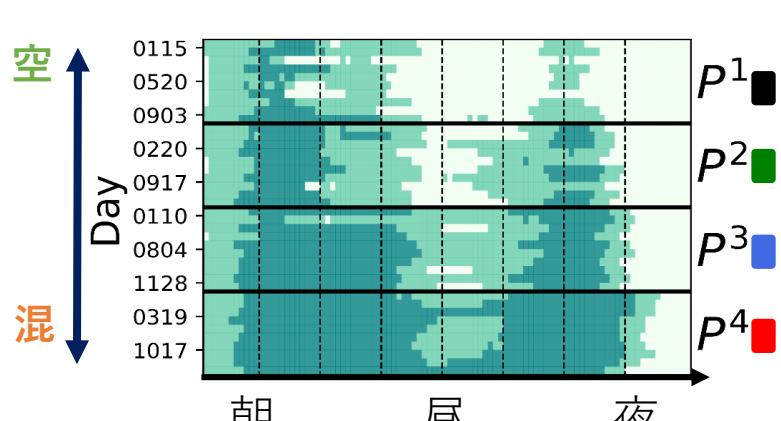
① 道路網の混雑レベルとパラメータの大小が一対一対応

$\theta \rightarrow$  大: 確定的行動  
 $\theta \rightarrow$  小: 確率的行動

# パラメータ推定結果: 日単位の混雑との対応

## ❖ 混雑推移パターン別のパラメータの日内推移過程

➤ 全分析対象日(40日)と、各パターン(10日)別に得た平均の推移過程



② パラメータの日内推移過程の大小:  $\theta_1 > \theta_2 > \theta_3 > \theta_4$

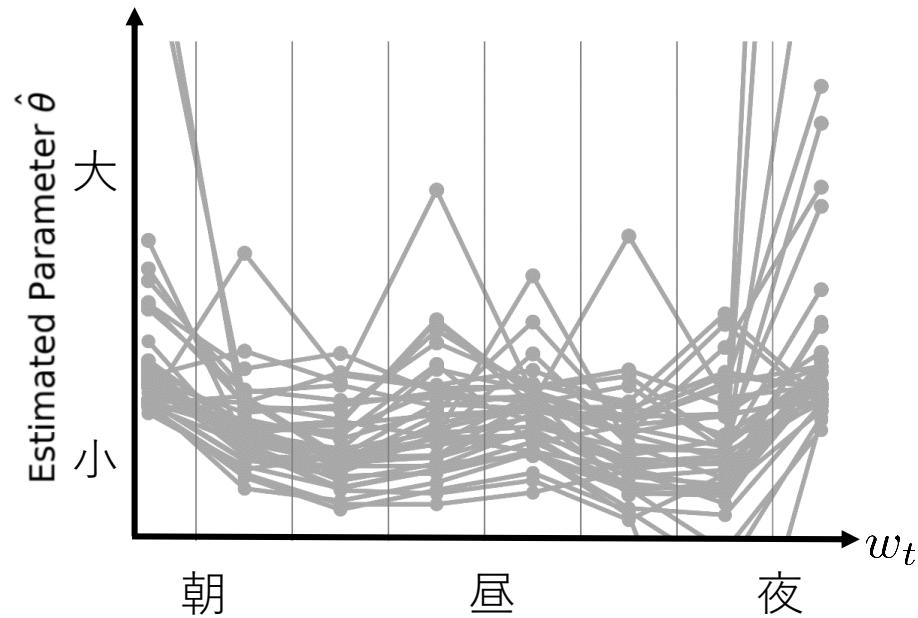
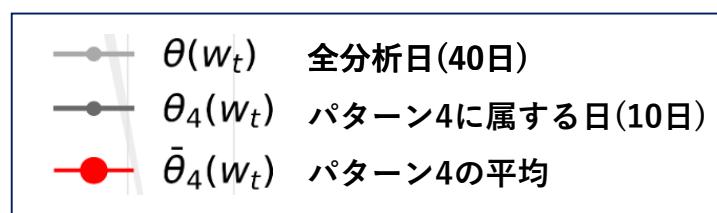
➤ 日単位の混雑レベルと一対一対応

|                               |
|-------------------------------|
| $\theta \rightarrow$ 大: 確定的行動 |
| $\theta \rightarrow$ 小: 確率的行動 |

# 混雑推移パターンとパラメータの推移過程

## ❖ 混雑推移パターン別のパラメータの日内推移過程

➤ 全分析対象日(40日)のうち、パターン4に属する日(10日)を抽出

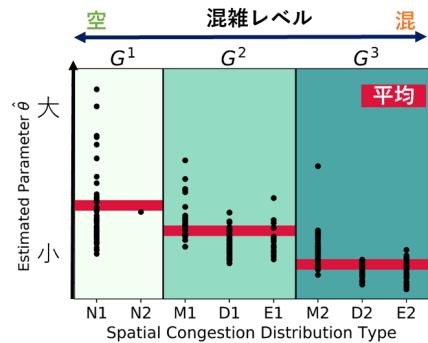


③ パターン  $i$  の日の日内推移過程  $\theta_i(w_t)$  ▶ 互いに似た形状

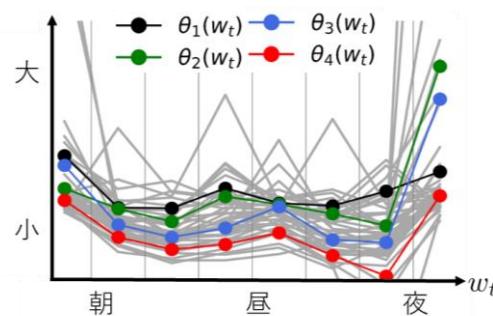
# 結果のまとめと解釈

## ◆ 結果のまとめ

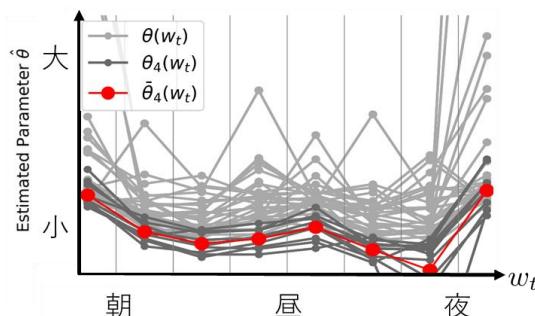
混雑レベルに応じた、パラメータの規則的な変動特性を発見



道路網の混雑レベルとの  
パラメータの大小関係



日々の混雑レベルと  
パラメータの大小関係



日々の混雑レベル別に  
パラメータ推移過程を分類

## ◆ 結果の解釈：モデルの仮定通りに選択行動している場合

- **交通費用に対する感度**が混雑状況に応じて変化

混雑が激しい ▶ パラメータ小 ▶ 確率的に様々な経路を選択  
混雑が少ない ▶ パラメータ大 ▶ 確定的に最短経路を選択

# 結果の解釈

## ❖ 本研究のモデルの仮定

### ➤ 旅行時間の先読み：*Perfect Foresight*な経路選択

- 全経路の旅行時間を完全に知っている状態で経路選択
- トリップで実際に経験する旅行時間が出発時にわかっている

### ➤ 旅行時間の変動リスクを考慮しない経路選択

- 旅行時間が確定的であることを仮定して経路を選択

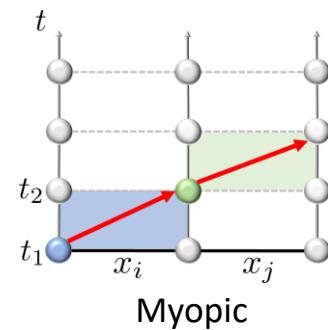
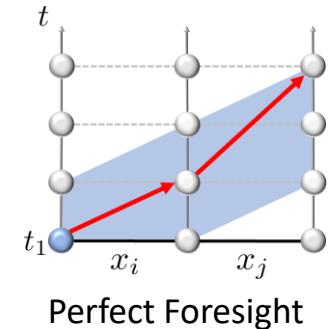
## ❖ 今後の検討事項：異なるモデルを用いた分析

### ➤ *Myopic*な経路選択を行うモデル

- 経路選択時に将来の変化の先読みを行わない
- その時点時点における旅行時間に基づき経路を選択

### ➤ 旅行時間の変動リスクを組み込んだモデル

- 旅行時間の確率的な変動を追加的コストとして認識
- 期待費用を最小化するような経路選択



# 参考文献

- ❖ Robillard, P : Calibration of Dial's Assignment Method, *Transportation Science*, Vol. 8, pp. 117-125, 1974.
- ❖ Fisk, C : Note on the Maximum Likelihood calibration on Dial's Assignment Method, *Transportation Research*, Vol. 11, pp. 67-68, 1977.
- ❖ Akamatsu, T.: Cyclic Flows, Markov Process and Transportation Stochastic Assignment, *Transportation Research*, Vol.13, pp. 279-287, 1996.
- ❖ Akamatsu, T.: Decomposition of Path Choice Entropy in General Transport Networks, *Transportation Science*, Vol. 31, pp. 349-362, 1997.
- ❖ 大口敬, 羽藤英二, 谷口正明, 吉井稔雄, 桑原雅夫, 森田綽之: 首都高速道路における経路選択行動に関する実態調査, 土木計画学研究・論文集, No.590/IV-39, pp.87-95, 1998.
- ❖ 社団法人土木学会: 交通ネットワークの均衡分析 -最新の理論と解法-, 土木学会, 1998.
- ❖ Fosgerau, M., Freijinger, E. and Karlstrom, A.: A link based network route choice model with unrestricted choice set, *Transportation Research Part B*, Vol.56, pp. 70-80, 2013.
- ❖ 酒井高良, 赤松隆: 首都圏高速道路網における渋滞パターンとMFDの関係性, 土木計画学研究・講演集, 58,(CD-ROM), 2018.
- ❖ Oyama, Y., Hara, Y., Akamatsu, T.: Dynamic traffic assignment based on the network generalized extreme value model: formulation, algorithm and parameter estimation, Working Paper, 2019.
- ❖ 酒井高良, 赤松 隆: 首都圏高速道路網における渋滞パターンとMacroscopic Fundamental Diagram の安定性, 土木学会論文集D3(土木計画学), Vol.75, No.2, pp.97-108, 2019.

# モデルの仮定

## ❖ロジットモデル

- 利用者の効用関数を最もシンプルに  $\theta t + \varepsilon$  と仮定
- 効用関数をより複雑に設定したうえで変動特性検証 ► 課題

## ❖Network-GEVモデル

- ロジットモデルのより一般的なモデル
- 本研究: パラメータ変動特性の入り口的位置づけ
  - **モデルを拡張し, より本格的に分析** ► 課題
    - ロジットモデルのIIA特性による影響
  - **弹性需要型に拡張** ► 課題
    - OD行動パターンの変動特性(パラメータの同時推定)

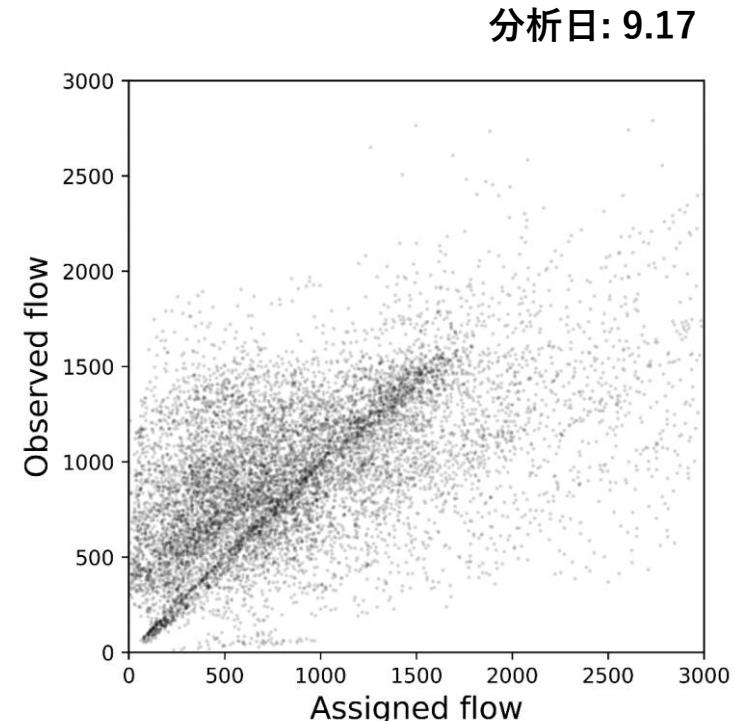
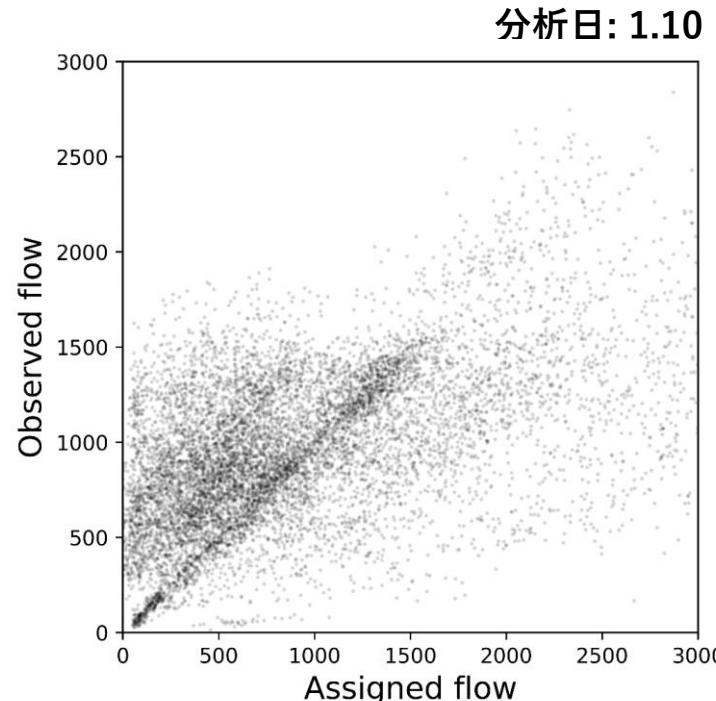
## ❖Dial配分とMarkov連鎖配分

- Markov配分を適用し, 経路を限定せず配分 ► Dial配分と比較

# モデルの適合度

## ◆配分交通量 vs. 観測交通量

- 横軸を配分交通量、縦軸を観測交通量としてリンク毎にプロット
- 45度線はある程度可観測だが、ばらつきは大きい
- Dial配分で経路を限定していることがばらつきをもたらしている?
- ODパターンがゆがんでいる可能性



# 最尤法(1) 経路変数による最尤方程式

## ❖最尤法

➤観測される交通量パターンが最も起こりやすくなるようなパラメータを推計する方法

## ❖尤度関数：最大化する $\theta$ が尤もらしいパラメータ

$$s(\theta) = \prod_k (P_k^{rs}(\theta))^{f_k^{rs}}$$

## ❖最尤方程式：尤度関数を最大化する $\theta$ を求める方程式

$$g(\theta) = \sum_{rs} \sum_k \tilde{f}_k^{rs} (c_k^{rs} - \sum_k c_k^{rs} P_k^{rs})$$

➤リンク変数による定式化: 取り扱いが困難…

# 最尤法(2): リンク変数による最尤方程式

## ❖ 経路変数からリンク変数への変換

- ネットワーク全体でのフロー保存則

$$q = \sum_{rs} \sum_k f_k^{rs}$$

- ネットワーク中の総交通費用, 平均交通費用は経路ベース, リンクベースのいずれでも一致

$$\sum_{rs} \sum_k c_k^{rs} f_k^{rs} = \sum_j c_j x_j \quad \sum_{rs} \sum_k c_k^{rs} P_k^{rs} = \sum_i c_i P_i$$

## ❖ 最尤方程式: リンク変数により定式化

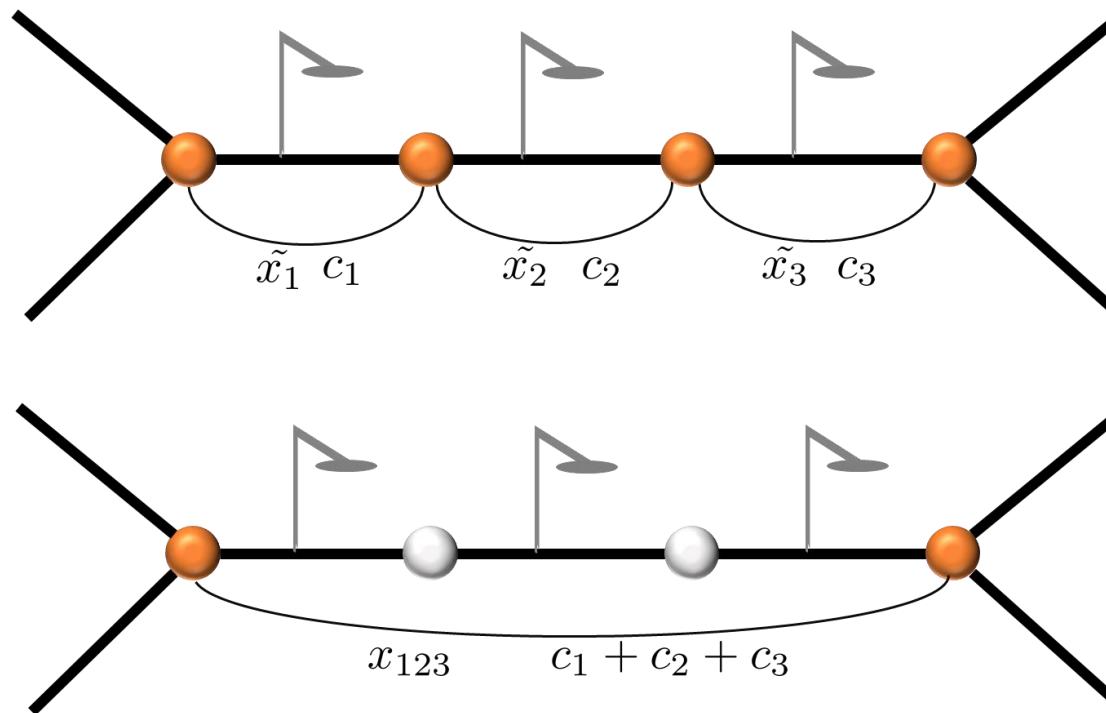
$$f(\theta) = \sum_{ij} c_{ij} x_{ij} - \sum_{ij} c_{ij} \tilde{x}_{ij}$$

- Robillard(1974)により提案: 本研究で動的枠組みに拡張

# 感知器情報とネットワークの対応

## ❖ ネットワークの構造

- 分岐・合流など経路選択に影響を与える点のみにノード設置
- ネットワーク内の感知器数 >> リンク数



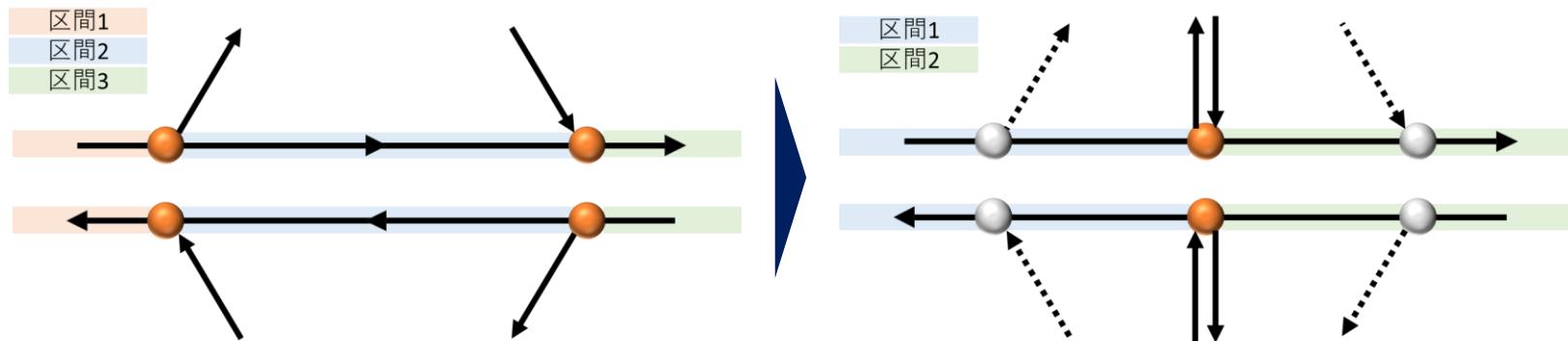
# ネットワークの再編方法

## ❖ 時空間ネットワークの利用には、元のネットワークを工夫して表現する必要

- 時空間ネットワークの時間軸最小単位: 最小リンク旅行時間
- 感知器と1対1対応したネットワーク: 最小旅行時間が数秒となるような短距離のリンクが存在(ex. IC, JCTなど)
- 時空間ネットワークが極めて大規模に…

## ❖ リンク長を長めに確保するための表現方法

- 経路選択の分析に最適なネットワークであればよい



# 時空間ネットワーク

## ❖効率的な取り扱い方法: 起点, 出発時刻別の効率化

➤時空間ネットワークは大変大規模なため, 配分を行う前に効率化

1. 時空間ネットワークを構築
2. 起点ノードを起点, 出発時刻から決定
3. 起点ノードから到達可能なノードを探索
4. 到達可能なノードとリンクのみを含む  
時空間ネットワークを抽出

➤これにより, 配分で取り扱う時空間ネットワークのリンク数は  
効率化を行う前の約1/20

➤効率化の回数は1時間帯につき約3000回  
(起点ノード数133 × 出発時刻数24(OD交通量は5分おきに出発))

配分実行時間: 3000回の効率化をした場合 << 効率化しない場合

# データについて

## ❖ リンク交通費用: 速度データとリンク長データから算出

- 時空間ネットワークの単位時間幅に合わせ10秒単位で端数処理

## ❖ 観測データの欠損部(リンク単位)に対する補間

- 速度データ(時間的に補間)

- 前後5分間にデータが存在する場合: 欠損時刻を除いた5分間の平均値により補間

- 存在しない場合: 当該リンクの制限速度により補間

- 交通量データ(空間的に補間)

- データが欠損している時刻の, 上流リンクと下流リンクにおける交通量データを参照し, その平均により補間

- 上流, 下流リンクいずれかのデータが欠損している場合: データが欠損していないリンクまで繰り返し参照

- 分岐・合流部: 欠損時刻においてフロー保存則が成立するように処理

# OD交通量推計(1)

## ❖二重制約エントロピーモデル

➤発生・集中交通量からOD交通量を推計可能

$$q_{rs} = A_r B_s O_r D_s \exp(-\gamma c_{rs})$$

$$\text{where } A_r = \left[ \sum_s B_s D_s \exp(-\gamma c_{rs}) \right]^{-1}$$

$$B_s = \left[ \sum_r A_r O_r \exp(-\gamma c_{rs}) \right]^{-1}$$

➤動的なOD交通量推計: 困難

**動的なOD交通量を簡易的に静的な枠組みで推計**

# OD交通量推計(2)

## ❖簡易的なOD交通量の動的推計

➤発生・集中交通量を「集約」し、「時間をずらして」静的に推計

### ➤集約の必要性

➤1分単位の発生集中交通量には「ゆらぎ」がある

➤集計して得たOD分布パターン: 集計した時間帯のODパターン

### ➤時間をずらした推計

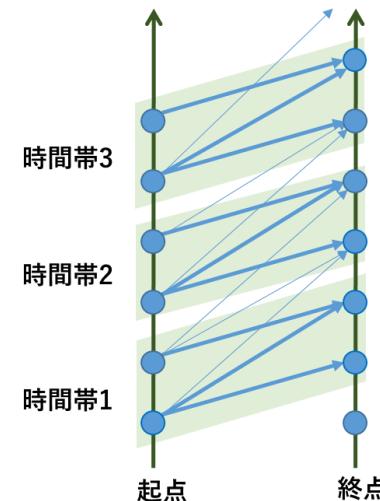
➤全ODペア間の最小経路費用の平均だけ

    集計する時間帯をずらす

➤集約時間幅は30分に設定

### ➤1時間あたりの総OD交通量:

➤平均約5万台



## ❖ETC2.0データを活用 ➤ 正確なOD交通量を取り扱い可能

# 推計日と時間幅

## ❖推計対象日の設定

➤酒井・赤松(2019)の推計対象日(年間全146日)から40日を抽出

| 項目           | 基準                        |
|--------------|---------------------------|
| 休日           | カレンダー情報を参考に土日祝を除外         |
| 休日の中日        | 前後が休日である平日を除外             |
| 雨天           | 1mm以上の降雨が観測されたら除外         |
| 年末年始, お盆, GW | 当該日を除外                    |
| 大規模規制日       | 道路網全体で大規模な交通規制が行われている日を除外 |
| 大規模データ欠損日    | 感知器不具合等で大規模なデータ欠損のある日を除外  |

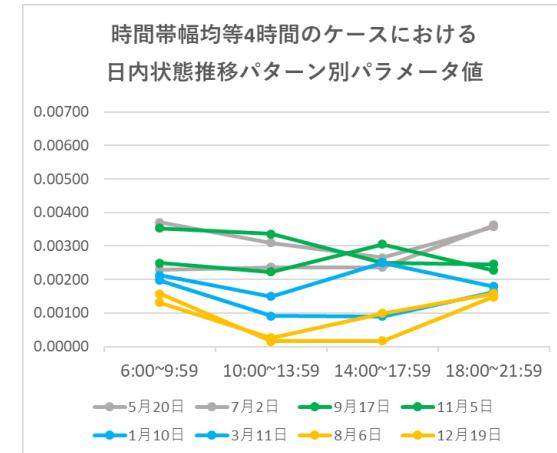
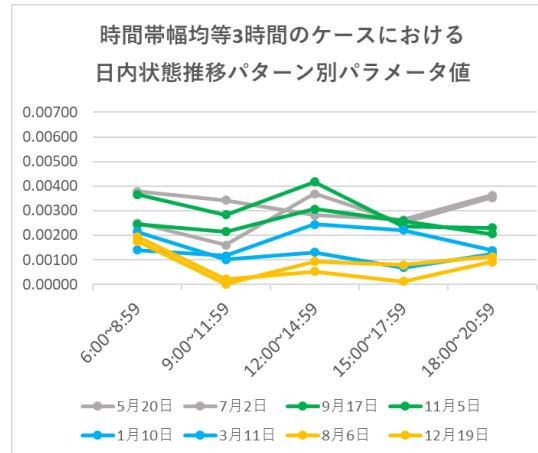
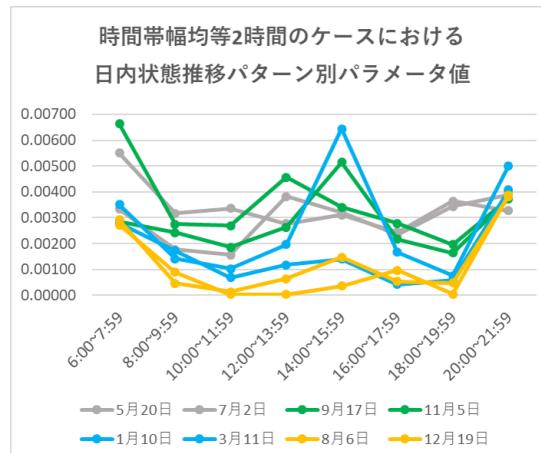
# 推計日と時間幅

## ❖推計時間帯の設定: 6時~22時

- ほとんど交通状態の変化しない夜間は対象外とした
- 予備実験段階で混雑との対応関係が予想されたため

## ❖推計時間幅の設定: 2時間刻み

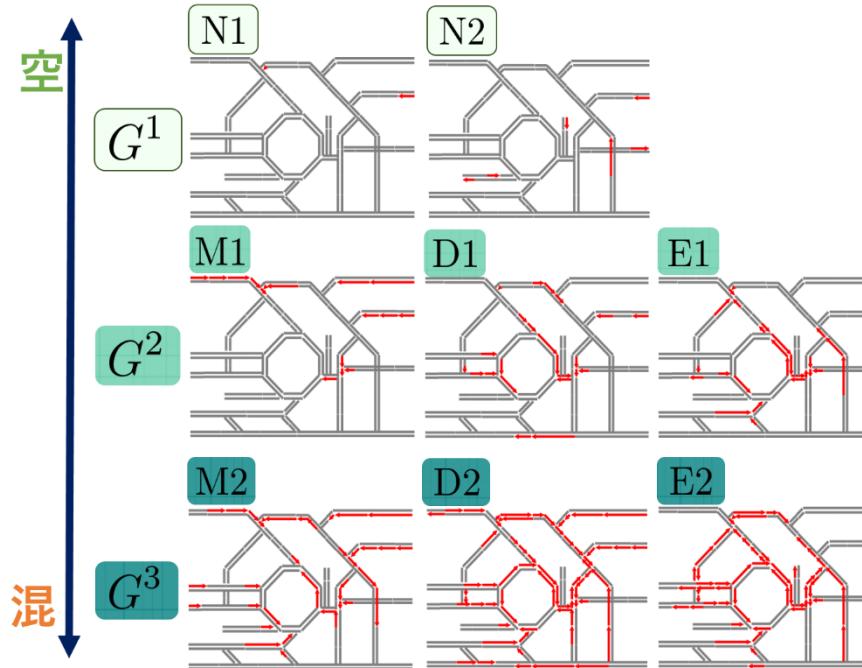
- 時間幅が長すぎると、交通状態の変化を捉えきれない
- 時間幅が短いほど、推計対象時間外に発生した交通の影響が大きくなる



# 道路網の混雑レベル

❖ 道路網上の渋滞空間分布が年間8タイプに限定可能(酒井)

➤ 8つのタイプを道路網の混雑レベルに応じて3グループに分類



➤ 時間帯ごとにタイプが出現

➤ 朝: (M1, M2) 曜: (D1, D2) 夕: (E1, E2) 夜: (N1, N2)

# 時間帯別の道路網の混雑レベル

## ❖ 道路網の混雑レベルの判定方法

- 道路網の混雑レベル: 10分おきに判定(酒井)
- 本研究では、2時間(1推計時間帯)のうちに最も多く出た渋滞空間分布タイプを、その時間帯の渋滞空間分布タイプと設定

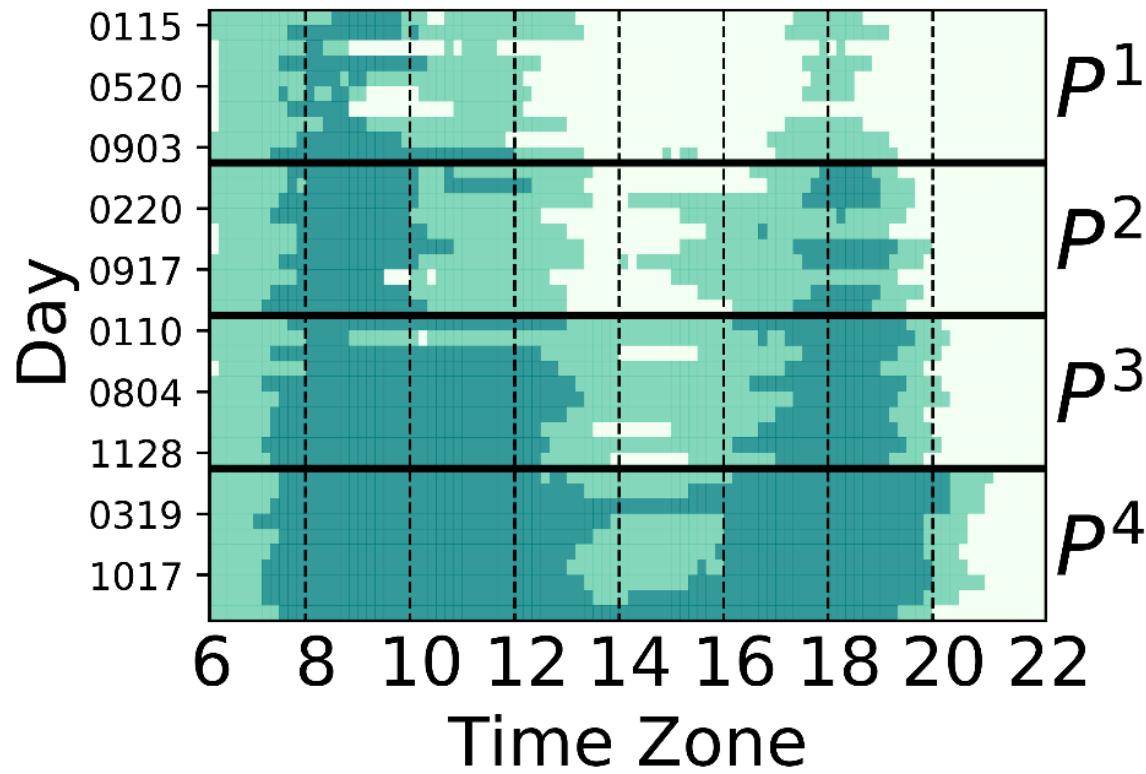
| グループ      | $G^1$ |    | $G^2$ |    |    | $G^3$ |    |    |
|-----------|-------|----|-------|----|----|-------|----|----|
| タイプ       | N1    | N2 | M1    | D1 | E1 | M2    | D2 | E2 |
| タイプ別出現回数  | 86    | 1  | 34    | 46 | 21 | 37    | 33 | 40 |
| グループ別出現回数 | 87    |    | 101   |    |    | 110   |    |    |

- 複数のタイプが同じ数だけ出た時間帯: 除外
  - 320個の推計値のうち、22個は対応するタイプが判定不可能

# 日々の混雑レベル

❖ 日内の混雑レベルの推移が4パターンに分類可能

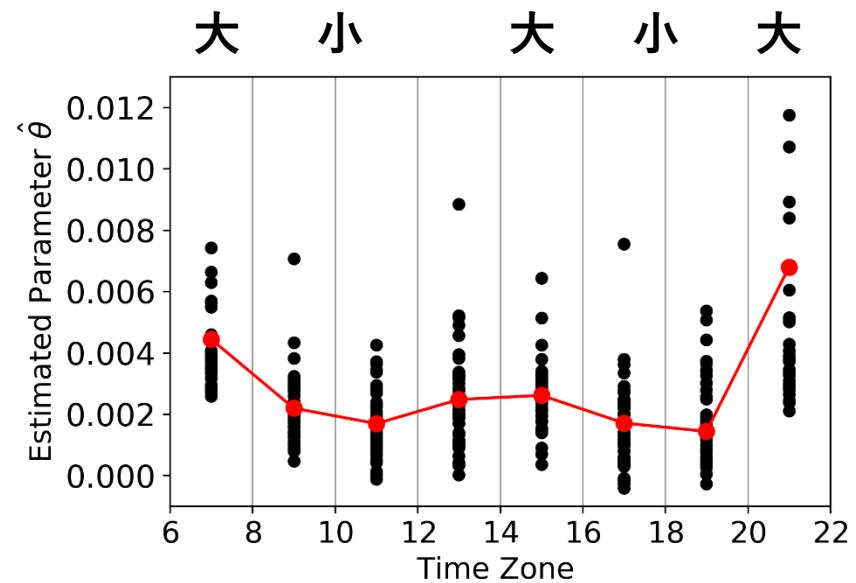
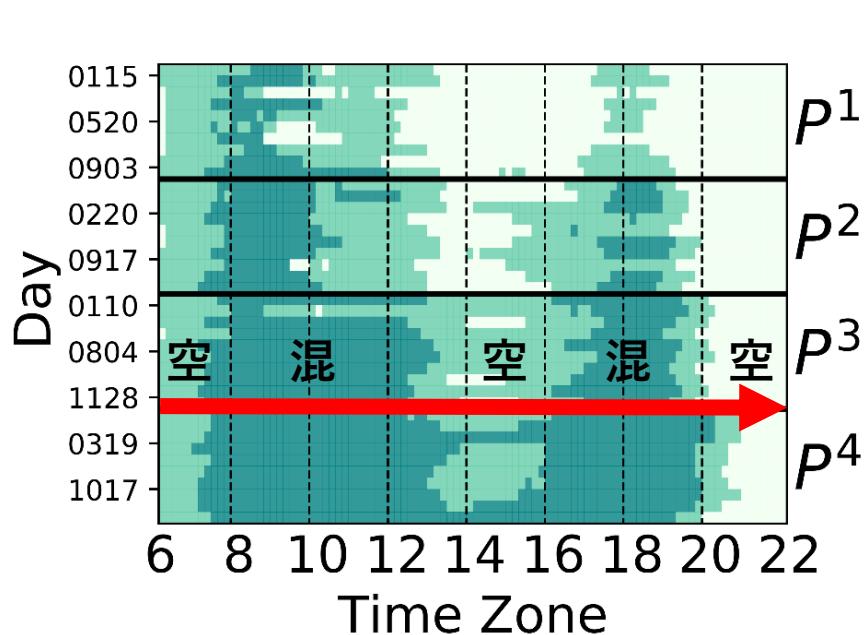
➤ パターンによらず、概ね(空, 混, 空, 混, 空)と変化



# パラメータの日内推移過程の形状の意味

## ❖ パラメータの日内推移過程と混雑レベルの日内推移

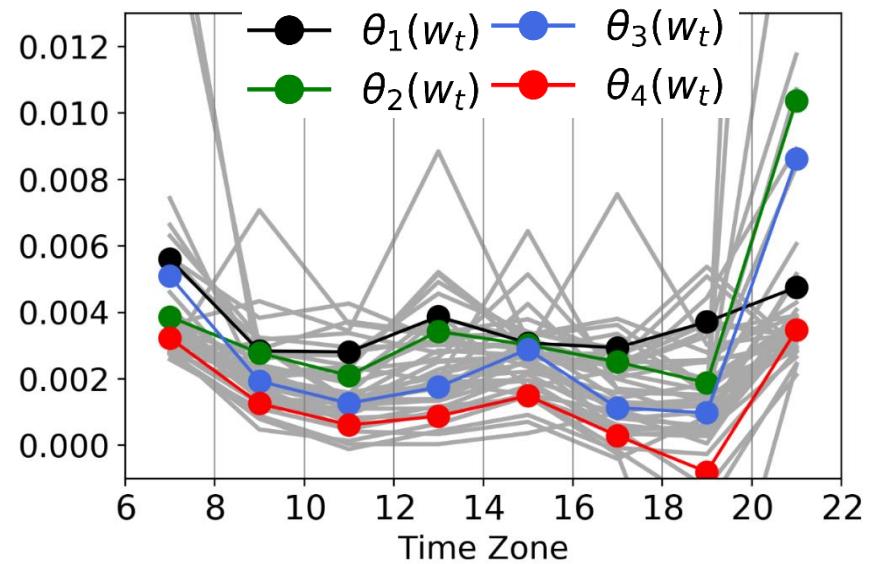
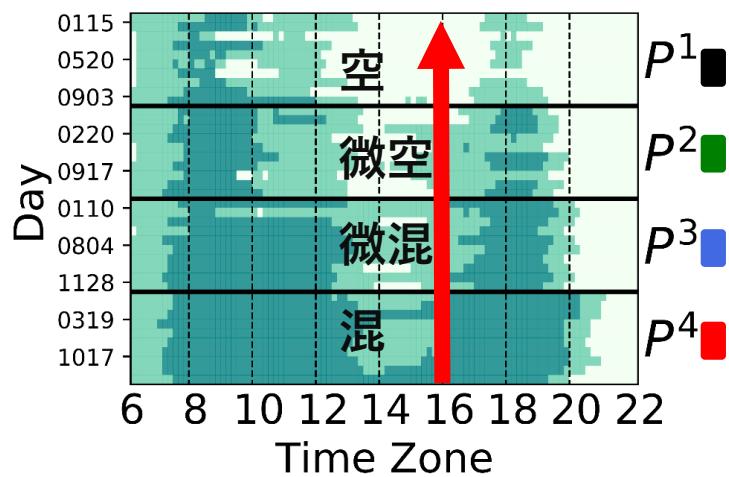
➤(空, 混, 空, 混, 空)の変化が(大, 小, 大, 小, 大)に対応



# 日単位の混雑レベルの相違

❖ 日内推移過程の大小: 日単位の混雑レベルの相違と対応

➤ 時間帯で見ると解釈が可能



➤ 混雑レベルの相違が不明瞭な時間帯 ➤ 大小関係にも乱れ

# パターン別日内推移過程

❖ 混雑していないパターンほど、ばらつきが大きい傾向

