

ネットワーク解析手法による交通規制が道路利用者・ネットワーク容量に及ぼす影響分析

嶋本 寛¹・原口 航²・東 浩輝²

¹正会員 宮崎大学准教授 工学部社会環境システム工学科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1)

shimamoto@cc.miyazaki-u.ac.jp

²非会員 宮崎大学工学部社会環境システム工学科

本研究では、経路交通量・経路選択パラメータの同時推定モデルと、交通ネットワーク容量推定モデルの 2 種類のモデルを用いて、交通規制が道路利用者および交通ネットワークに及ぼす影響を評価した。道路利用者の影響に関しては、バスレーン規制施策導入により混雑に関する不確実性が増加することを確認した。さらに、バスレーン規制導入によりバスレーンを含む経路の規制時間帯中の交通量が減少することを確認した。交通ネットワークに及ぼす影響に関しては、バスレーン規制導入後のネットワーク容量が大きく減少し、道路利用者の不確実性に対する認知の変化が影響している可能性を示した。

Key Words: *traffic regulation, route choice parameter, path flow, network capacity*

1. はじめに

宮崎市において、公共交通の利用促進を目的に 2016 年 2 月からバスレーン規制が本格実施され、市内中心部において朝夕のラッシュ時間帯で 2 車線あるいは 3 車線のうち 1 車線がバス専用レーン化された。これにより、自動車利用は経路変更や出発時刻変更などの対応行動をとり、これらの行動が都市内の交通ネットワークにも影響が及ぶことが考えられる。今後は、バスレーン規制のみならず自動車の走行空間の削減をとまなう交通規制が全国各地で行われる可能性がある中で、交通規制による自動車利用者の対応行動と、それにとまなう交通ネットワーク性能の変化を把握することが重要である。

交通ネットワーク性能を評価する手法として、「すべてのリンク交通量が容量を超過させずに流れることができる最大 OD 交通量」として定義されるネットワーク容量が知られている¹⁾。ネットワーク容量は、i) reserve capacity, ii) ultimate capacity, iii) practical capacity という 3 つの概念に分類される²⁾。Reserve capacity は、すべてのリンク容量を超過させないような、所与の OD パターンに対する定数倍を求める問題として定式化される。これに対し、ultimate capacity はリンク容量制約を違反しない最大の OD パターンを求める問題として定式化され、ベースとなる OD パターンは存在しない。Practical capacity は、リンク容量制約を違反しない、所与の OD パターンに対して上乗せできる OD 交通量を求める問題として定式化される。

一方、赤松ら³⁾は(確定的)利用者均衡条件下において、所与の OD パターンに最も近くリンク容量制約を違反しない最大 OD 交通量パターンを求める問題を提案している。ネットワーク容量を用いた交通施策評価に関する研究に関して、Sumallee ら⁴⁾は災害後の交通規制施策の比較分析を行っている。

ネットワーク容量を推定するためには、ベースとなる OD パターンと利用者の経路選択規範(経路選択パラメータ)が必要である。中山ら⁵⁾は、観測リンク交通量の相関関係を考慮して経路選択パラメータを最尤推定する方法を提案している。さらに、中山ら⁶⁾は、兵藤ら⁷⁾のモデルを拡張することにより、経路重複の影響も加味した経路列挙を必要としない推定手法を提案している。安藤ら⁸⁾は観測された交通量データを用いて、Logit 型の経路選択パラメータの推定、比較を行っている。石川ら⁹⁾は首都圏高速道路を対象にして、経路選択パラメータを動的に最尤推定し、経路選択パターンの規則性を分析している。これらの経路選択パラメータを推定する研究は OD 交通量を所与としており、OD 交通量が不明の場合は別途推定する必要がある。Yang⁹⁾らは、リンク交通量および OD 交通量に対する推定値と観測値の残差平方和の合計を最小にする、OD 交通量と経路選択パラメータを同時に推定するモデルを構築している。Lo¹⁰⁾らは、リンク交通量および OD 交通量の観測変数を用いて尤度関数を定義し、これを最大にする OD 交通量と経路選択パラメータ推定するモデルを提案している。(なお、観測

リンク交通量, 観測 OD 交通量がともに無相関であれば, 両者のモデルは等価である.) Yang⁹⁾ら, Lo¹⁰⁾らとともに, MCA により経路列挙することなくフローを算出している. 筆者らは, 先行研究¹¹⁾経路交通量と経路選択パラメータを同時推定するモデルを宮崎都市圏ネットワークに適用し, バスレーン規制前後における経路選択パラメータの比較により交通規制が利用者行動に及ぼす影響を明らかにしている.

以上を踏まえて, 本研究では先行研究で構築した経路選択パラメータと経路交通量を同時推定するモデルを用いて, バスレーン規制前後における経路選択パラメータ, 経路交通量を比較することにより交通規制が道路利用者に及ぼす影響を分析する. さらに, バスレーン規制前後のネットワーク容量を比較することにより, 交通規制とそれによる利用者行動の変化が交通ネットワークに及ぼす影響を分析する. 前述したように, 交通ネットワーク容量は様々な概念が提案されているが, 本研究では所与の OD パターンからの変化を許容しつつも, それから最も近い最大 OD パターンを求解する赤松ら³⁾のモデルをベースに, ネットワーク容量を推定する.

2. モデルの定式化

(1) 分析の枠組み

図-1 に本研究の分析の枠組みを示す. まず, 交通量検知器データにより観測されるリンク交通量データと OD 交通量の先験情報データを用いて, 経路選択パラメータと時間帯ごとの OD 交通量, 経路交通量を日ごとに推定する. ついで, 推定された経路選択パラメータと OD 交通量データを用いて, 日ごと, 時間帯ごとのネットワーク容量を推定する.

後述するように, 本研究ではバスレーン規制施行前の 1 週間と施行後の 2 週間の, 計 3 週間にわたるリンク交通量と OD 交通量の先験情報データを収集した. 上記枠組みにより推定された経路交通量とネットワーク容量を比較することで, バスレーン規制が道路利用者と交通ネットワークの双方に及ぼす影響を評価できる.

(2) 経路交通量・経路選択パラメータ推定モデル¹¹⁾

a) 記号表記

本節で用いる記号表記とその意味を以下に示す. なお, 以下ではベクトル \mathbf{z} あるいは行列 \mathbf{A} の転置をそれぞれ \mathbf{z}^{tr} , \mathbf{A}^{tr} のように表記する.

- A : リンク集合
- M : 交通量が計測されているリンクの集合
- W : OD ペアの集合
- K_w : OD ペア $w \in W$ における経路集合
- δ_{wk}^a : OD ペア $w \in W$ における経路 k がリンク a を通過すれば 1, そうでなければ 0 をとるダミー変数

- T : 時間帯の集合
- \mathbf{x}^{τ} : 時間帯 τ の推定リンク交通量ベクトル
($\mathbf{x}^{\tau} = (x_1^{\tau}, \dots, x_{|M|}^{\tau})^{\text{tr}}$)
- \mathbf{v}^{τ} : 時間帯 τ の観測リンク交通量ベクトル
($\mathbf{v}^{\tau} = (v_1^{\tau}, \dots, v_{|M|}^{\tau})^{\text{tr}}$)
- \mathbf{f}^{τ} : 時間帯 τ の経路交通量ベクトル
($\mathbf{f}^{\tau} = (\dots, f_{wk}^{\tau}, \dots)^{\text{tr}}$)
- \mathbf{q}^{τ} : 時間帯 τ の推定 OD 交通量ベクトル
($\mathbf{q}^{\tau} = (q_1^{\tau}, \dots, q_{|W|}^{\tau})^{\text{tr}}$)
- \mathbf{Q}^{τ} : 時間帯 τ の経路交通量ベクトル
($\mathbf{Q}^{\tau} = (Q_1^{\tau}, \dots, Q_{|W|}^{\tau})^{\text{tr}}$)
- \mathbf{x} : 推定リンク交通量ベクトル
($\mathbf{x} = (\mathbf{x}^1, \dots, \mathbf{x}^T)^{\text{tr}}$)
- \mathbf{v} : 観測リンク交通量ベクトル
($\mathbf{v} = (\mathbf{v}^1, \dots, \mathbf{v}^T)^{\text{tr}}$)
- \mathbf{f} : 推定経路交通量ベクトル
($\mathbf{f} = (\mathbf{f}^1, \dots, \mathbf{f}^T)^{\text{tr}}$)
- \mathbf{q} : 推定 OD 交通量ベクトル
($\mathbf{q} = (\mathbf{q}^1, \dots, \mathbf{q}^T)^{\text{tr}}$)
- \mathbf{Q} : 先験 OD 交通量ベクトル
($\mathbf{Q} = (\mathbf{Q}^1, \dots, \mathbf{Q}^T)^{\text{tr}}$)
- $t_a(x_a)$: リンク a の旅行時間
- t_{a0} : リンク a の自由流旅行時間
- C_a : リンク a の容量
- c_{wk}^{τ} : 経路 $k \in K_w$ の旅行時間
($c_{wk}^{\tau} = \sum_{a \in A} \delta_{wk}^a t_a(x_a^{\tau})$)
- θ, η : 経路選択パラメータ
- PS_{wk} : 経路間のリンク共有の程度を表す修正項
- λ_1, λ_2 : 目的関数の重み

b) 定式化

本研究で構築するモデルは, 式(3)に示すように自動車利用者は確率的利用者配分規範に従って経路選択するという条件のもと, 式(1)に示すリンク交通量と OD 交通量の重み付き二乗和を最小にするように OD 交通量 \mathbf{q} と経路選択パラメータ θ および η を決定するものである.

$$\min_{\mathbf{q}, \theta, \eta} G = \sum_{\tau \in T} \left(\lambda_1 \sum_{a \in M} (x_a^{\tau} - v_a^{\tau})^2 + \lambda_2 \sum_{w \in W} (q_w^{\tau} - Q_w^{\tau})^2 \right) \quad (1)$$

Subject to

$$\mathbf{q} \geq \mathbf{0}, \theta > 0, \eta > 0 \quad (2)$$

ここに,

$$\begin{aligned} & \mathbf{x}^{\tau}(\mathbf{f}^{\tau}) \\ &= \arg \min_{\mathbf{x}^{\tau}(\mathbf{f}^{\tau})} \left[\sum_{a \in A} \int_0^{x_a^{\tau}} t_a^{\tau}(w) dw + \frac{1}{\theta} \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} \left\{ f_{wk}^{\tau} \ln \left(\frac{f_{wk}^{\tau}}{q_w^{\tau}} \right) + \eta f_{wk}^{\tau} \ln PS_{wk} \right\} \right] \quad (3) \end{aligned}$$

Subject to

$$x_a^\tau = \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} \delta_{wk}^\alpha f_{wk}^\tau, \forall a \in A, \tau \in T \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K_w} f_{wk}^\tau = q_w^\tau, \forall w \in W, \tau \in T \quad (5)$$

$$f_{wk}^\tau \geq 0, \forall w \in W, k \in K_w, \tau \in T \quad (6)$$

$$t_a(x_a^\tau) = t_{a0} \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{x_a^\tau}{c_a} \right)^\beta \right\}, \forall \tau \in T \quad (7)$$

式(3)から式(7)は確率的利用者均衡条件を表している。なお、式(3)から式(7)のキューンタッカー条件より、経路交通量は以下のように算出される。

$$f_{wk}^\tau = \frac{\exp(-\theta c_{wk}^\tau - \eta \ln PS_{wk})}{\sum_{k' \in K_w} \exp(-\theta c_{wk'}^\tau - \eta \ln PS_{wk'})} q_w^\tau, \forall w \in W, k \in K_w, \tau \in T \quad (8)$$

なお、式(8)に示す経路選択確率は多項ロジットモデルであり、重複部分が多い経路に大きな交通量が負荷されてしまう問題点がある。これを緩和するために、以下に示す経路間のリンク共有の程度を表す修正項を導入している。

$$PS_{wk} = \sum_{a \in A} \frac{\delta_{wk}^\alpha l_a}{L_{wk}} \frac{1}{\sum_{k' \in K_w} \frac{L_{wk'}^{\min}}{L_{wk}}} \quad (9)$$

, $\forall w \in W, k \in K_w$

なお、確率的利用者均衡配分モデルにおいて、しばしば経路の列挙方法が問題となるが、本研究では計算時間を短縮するために列生成法により経路列挙を行った。

本節で構築したモデルの解法アルゴリズムは、先行研究¹⁾を参照されたい。

(3) ネットワーク容量推定モデル

a) 記号表記

前節で用いた記号表記に加えて、本節では以下の記号を定義する。

- \mathbf{q}^* : 最大 OD 交通量ベクトル
- \mathbf{x}^* : 最大リンク交通量ベクトル
- \mathbf{f}^* : 最大経路交通量ベクトル
- $\hat{\mathbf{q}}$: 外生的に与える OD 交通量
- $\bar{\mathbf{q}}$: OD ペアごとに設定する十分大きな値 (定数) のベクトル
- \mathbf{e} : 超過 OD 交通量ベクトル
- $\bar{\mathbf{u}}$: OD ペアごとに設定する超過リンクのコスト

b) 定式化

本節では、赤松ら³⁾のモデルに対してドライバーの行動規範を確率的利用者均衡配分に拡張したモデルを用いて最大ネットワーク容量を推定する。赤松らと同様に、OD ペアごとに移動コストが大きな値 \bar{u} である「超過リンク」をもとのネットワークに追加したネットワークに、十分大きな OD 交通量 $\bar{\mathbf{q}}$ を流す。このとき、リンク容量を超過するフローは「超過リンク」を流れ、もとのネットワークを流れる OD 交通量 \mathbf{q}^* が求める最大 OD 交通量

となり、これを合計したものをネットワーク容量となる。ネットワーク容量推定モデルは、以下のように定式化できる。

【MNC-SUE】

$$\min_{\mathbf{x}, \mathbf{e}, \mathbf{q}} F(\mathbf{x}^*, \mathbf{e}, \mathbf{q}^*) = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a^*} t_a(\omega) d\omega + \frac{1}{\theta} \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} \{f_{wk}^* (\ln f_{wk}^* - 1) + \eta f_{wk}^* \ln PS_{wk}\} + \sum_{w \in W} \bar{u}_w e_w \quad (10)$$

subject to

Eqs(4)–(7)

$$q_w^* + e_w = \bar{q}_w, \forall w \in W \quad (11)$$

$$e_w \geq 0, \forall w \in W \quad (12)$$

$$x_a^* \leq c_a, \forall a \in A \quad (13)$$

式(10)における第 1 項と第 2 項は、式(3)の右辺と同一の確率的利用者均衡条件を表しており、第 3 項は超過リンクを流れる交通量のコストを表している。式(11)は最大 OD 交通量と超過 OD 交通量の関係を表している。式(12)、式(13)はそれぞれ超過リンク交通量の非負条件、もとのネットワーク上のリンク容量制約条件を表している。

c) 一意な最大 OD 交通量パターン

【MNC-SUE】はリンク交通量に関して凸であるが、OD 交通量に関して凸ではないため、最大 OD 交通量は一意に定まらない。(ただし、目的関数の最適値は一意に定まる。)そこで、外生的に与えられた OD 交通量のパターン $\hat{\mathbf{q}}$ に最も近い最大 OD 交通量を求めると考えれば、最大 OD 交通量を以下の 2 段階最適化問題として一意に求めることができる³⁾。

【MNC-SUE-Uni-S】

$$\min Z_1(\mathbf{q}^*) = \sum_{w \in W} q_w^* \ln \left(\frac{q_w^*}{\hat{q}_w} \right) \quad (14)$$

subject to

$$\sum_{a \in A} \int_0^{x_a^*} t_a(\omega) d\omega + \frac{1}{\theta} \sum_{w \in W} \{f_{wk}^* (\ln f_{wk}^* - 1) + \eta f_{wk}^* \ln PS_{wk}\} + \sum_{w \in W} \bar{u}_w e_w \leq \bar{\zeta} \quad (15)$$

Eqs(4)–(7), (11)–(13)

ただし、 $\bar{\zeta}$ は式(10)に示す目的関数の最適値であり、【MNC-SUE】を解けば一意に定まるので定数である。ここで、制約条件(15)に対するラグランジュ乗数を ζ とすれば、【MNC-SUE】は以下に示す 1 段階最適化問題として再定式化できる³⁾。

【MNC-SUE-Uni-SPD】

$$\begin{aligned}
 \max_{\zeta} \min_{\mathbf{q}^*, \mathbf{x}^*(\mathbf{f}^*)} Z_2(\mathbf{q}^*, \mathbf{x}^*(\mathbf{f}^*), \zeta) \\
 &= \sum_{a \in A} \int_0^{x_a^*} t_a(\omega) d\omega \\
 &+ \frac{1}{\theta} \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} \{f_{wk}^* (\ln f_{wk}^* - 1) \\
 &+ \eta f_{wk}^* \ln PS_{wk}\} \\
 &+ \frac{1}{\zeta} \sum_{w \in W} q_w^* \ln q_w^* \\
 &- \sum_{w \in W} q_w^* \lambda_w
 \end{aligned} \tag{16}$$

subject to

Eqs(4)–(6) and (13)

ここに,

$$\lambda_w \equiv \bar{u}_w + \frac{1}{\zeta} \ln \hat{q}_w, \forall w \in W \tag{17}$$

式(14)は \mathbf{q}^* に関して凸であり, 式(17)は \mathbf{f}^* と \mathbf{x}^* に関して凸であるため, 鞍点定理より非負のラグランジュ乗数 ζ の最大値は一意に定まる. したがって, ある ζ に対する式(16)を最小にする \mathbf{q}^* , \mathbf{f}^* を求めることができれば, 両者の求解を繰り返すことで【MNC-SUE-Uni-SPD】を解くことができる.

いま, ラグランジュ乗数 ζ の値が所与のとき, カルーシ・クーン・タッカー条件より最大 OD 交通量および最大経路交通量は解析的に以下のように求解できる.

$$\begin{aligned}
 q_w^* \\
 &= \exp \left[\frac{\zeta}{\theta + \zeta} \ln \left\{ \sum_{k \in K_w} \exp \left(- \left(\theta \sum_{a \in A} (t_a(x_a^*) \right. \right. \right. \right. \\
 &\left. \left. \left. + d_a \right) \delta_{wk}^a + \eta \ln PS_{wk} + 1 \right) \right\} \right] \\
 &+ \frac{\theta}{\theta + \zeta} (\zeta \bar{u}_w - 1) \left] \hat{q}_w^{\frac{\theta}{\theta + \zeta}}
 \end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{aligned}
 f_{wk}^* \\
 &= \exp \left[- \frac{\theta}{\theta + \zeta} \left\{ \ln \left(\sum_{k' \in K_w} \exp \left(- \theta \sum_{a \in A} (t_a(x_a^*) \right. \right. \right. \right. \right. \\
 &\left. \left. \left. + d_a \right) \delta_{wk'}^a - \eta \ln PS_{wk'} \right) \right\} \right] \\
 &\left. \times \exp \left[\frac{\theta}{\theta + \zeta} (\zeta \bar{u}_w - 1) \right] \right. \\
 &\left. - \left(\theta \sum_{a \in A} (t_a(x_a^*) + d_a) \delta_{wk}^a + \eta \ln PS_{wk} \right) \right] \hat{q}_w^{\frac{\theta}{\theta + \zeta}}
 \end{aligned} \tag{19}$$

ただし, d_a および \bar{u}_w はそれぞれ式(13), 式(5)に対するラグランジュ乗数である. 特に, d_a はリンク容量超過にともなう遅れ時間を表している.

式(18)および(19)を見ると, 定数である超過リンクのコスト \bar{u} が大きくなるにつれ, 最大 OD 交通量および最大経路交通量も大きくなるのがわかる. しかし, リンク



図-1 バスレーン規制の概要

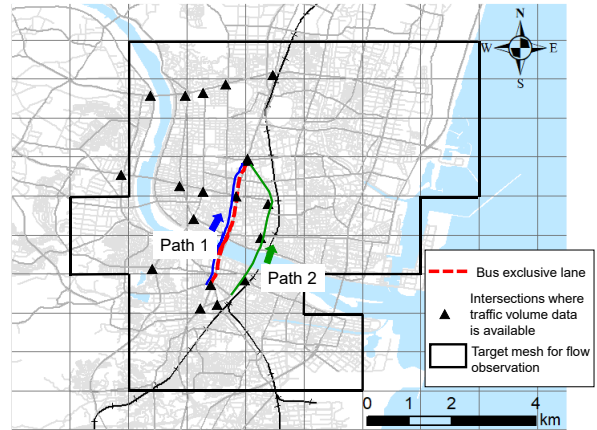


図-2 入手データの位置関係

a の交通量がリンク容量を超過すると, ラグランジュ乗数 d_a が正の値をとり最大 OD 交通量および最大経路交通量を減少させるように働く. 最終的に, 2 つのラグランジュ乗数がバランスをとってリンク容量を超過しない最大 OD 交通量を求めることができる. 詳細は省略するが, iterative balancing scheme^{12), 13)}に準じたアルゴリズムにより最大 OD 交通量を求解することができる.

3. ケーススタディ

(1) バスレーン規制の概要

宮崎市では, 2016年2月よりバスレーン規制が本格実施された. これにより, 図-1に示す宮崎市中心部の一部区間において, 平日の朝夕1時間に限り2車線あるいは3車線のうち1車線がバス専用レーン化された.

(2) データ概要

分析に用いたデータは, 以下の2つである.

a) 車両感知器データ

観測リンク交通量データとして, 図-2に示す18箇所の交差点における80基の車両感知器により観測された,

17:00 から 19:00 までの間の 30 分ごとの交通量データを用いた。なお、異常値として記録されているデータは分析から除外した。

b) モバイル空間統計データ

OD 交通量の先験情報として、モバイル空間統計の人口流動統計データを用いた。バスレーン規制本格実施前にあたる 2016 年 1 月 22 日から 1 月 31 日と、本格実施後にあたる 2 月 1 日から 2 月 20 日までの平日における、図-2 に示す 47 メッシュ間 1 時間ごとの流動データを入手した。なお、人口流動統計データは 1 時間ごとのデータであるが、これを各時間帯における車両感知器データの 30 分ごとの総交通量で按分することで、30 分ごとの流動データに変換した。

(3) データ概要とパラメータ設定

本研究では、前述した人口流動統計データの入手範囲である 47 メッシュを内包する範囲における主要な道路を抽出し、分析対象ネットワークを作成した。作成したネットワークにおけるノード数、リンク数はそれぞれ 305, 847 である。また、47 メッシュの概ね中心に位置するノードをセントロイドとした。さらに、域外からの交通を考慮するため、南北および西の域外にダミーのセントロイドを設定し、ダミーのセントロイドから域内の端に位置するノードの間に、所要時間が 0 のダミーリンクを設定した。なお、モバイル空間統計データには、域外から分析対象メッシュ間の流動の合計、および分析対象メッシュから域外間の流動の合計も含まれているため、ダミーセントロイドを発着する流動の合計が、これらの流動との差が小さくなるように求解した。

それぞれのモデルで設定したパラメータは表-1 の通りである。

表-1 分析に用いたパラメータ

モデル	パラメータ
経路列挙	$\theta = 0.5, \eta = 0$
経路交通量・経路選択パラメータ推定モデル	$\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 1$
ネットワーク容量推定モデル	$\bar{u} = 2, \bar{q} = 3\hat{q}$

※ \hat{q} は経路交通量・経路選択パラメータ推定モデルの推定結果を用いた。

(4) 交通規制が道路利用者に及ぼす影響分析

本節では、交通規制が道路利用者に及ぼす影響を評価する。まず、図-3 に RMSEP 値として定義されるリンク交通量の推定精度を示す。RMSEP 値は日および時間帯によって大きな違いはないといえる。図-4 に 1 月 22 日のリンク交通量の観測値と推定値の関係を示す。観測交通量の多いリンクはやや過大推定される傾向にあるもの

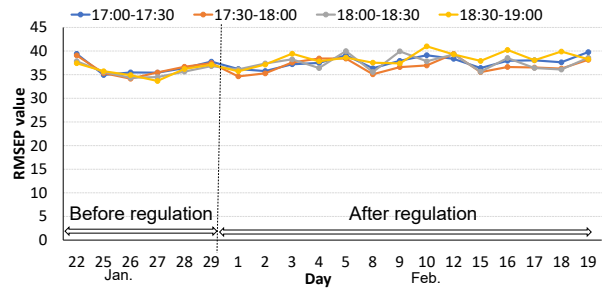


図-3 リンク交通量の推定精度の比較

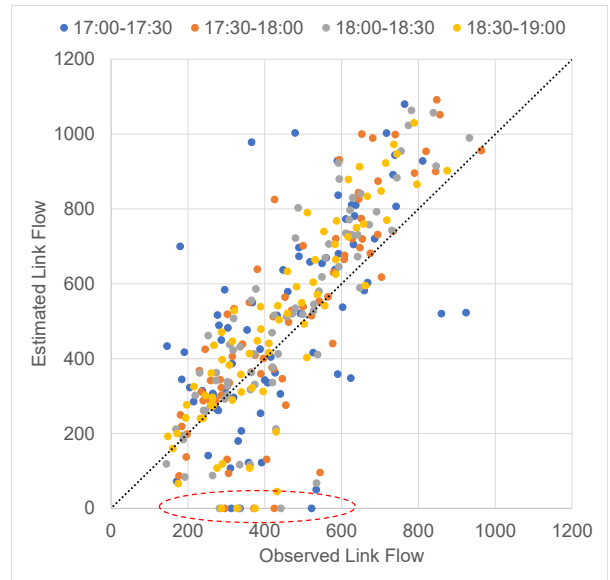


図-4 1 月 22 日におけるリンク交通量の推定精度比較

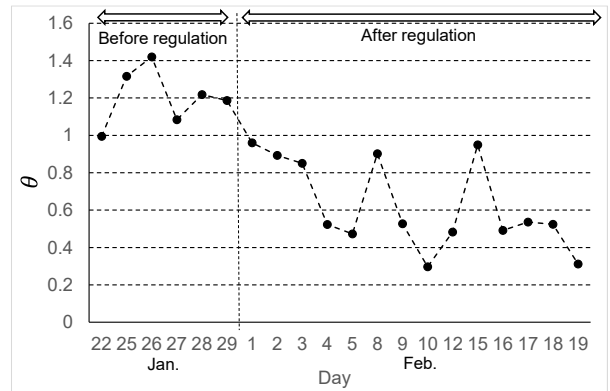
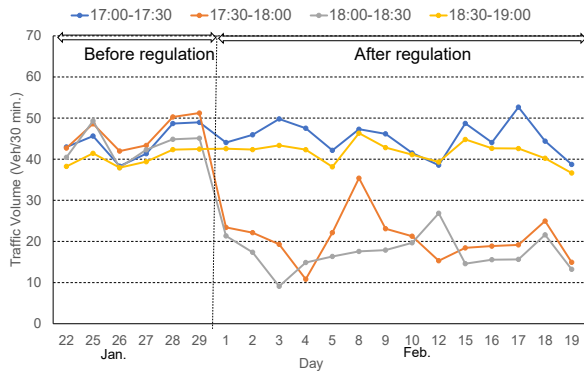


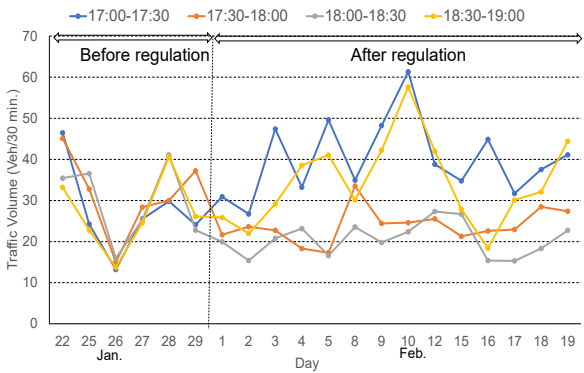
図-5 分散パラメータの推移

の、概ね精度良く推定されているといえる。しかし、図中の赤丸に示した一部のリンク交通量が 0 と推定されている。これは、これらのリンクが経路集合に含まれていないことが原因であり、経路集合の生成に改良の余地があるといえる。

次に、図-5 に経路選択パラメータの推定値の推移を示す。バスレーン規制導入前は比較的大きい値で推移しているが、バスレーン規制導入後は値が減少している。これは、バスレーン規制導入直後から、道路利用者の混雑



(a) 経路 1



(b) 経路 2

図-6 日ごと、時間帯ごとの経路交通量の推移

に対する不確実性が大きくなったことを表している。図-6に、図-2中に示す2つの経路の交通量を示す。バスレーン規制が実施された経路1に関しては、バスレーン規制の実施により17:30~18:00および18:00~18:30の規制時間帯中の経路交通量が大幅に減少したものの、バスレーン規制以外の時間帯における経路交通量は大きく変化していないことがわかる。一方、経路1の平行経路である経路2に関しては、バスレーン規制実施により17:30~18:00および18:00~18:30の交通量が増加していない。したがって、バスレーン規制導入により、道路利用者は経路変更を行うのではなく、移動手段の変更や移動の取りやめ等の対応行動をとったことが推察される。

(5) 交通規制がネットワーク容量に及ぼす影響分析

本節では、交通規制とそれともなう利用者行動の変化が交通ネットワーク容量に及ぼす影響を評価する。なお、本節ではリンク交通量を、 $\tilde{c}_a = \max(c_a, x_a)$ (x_a は前節の分析により推定されたリンク交通量)として計算をすすめた。図-7に、推定されたネットワーク容量の推移を示す。バスレーン規制導入後は、バスレーン時間帯中のネットワーク容量はバスレーン規制以外の時間帯のそれよりもわずかに低下していることがわかる。しかし、バスレーン規制導入前後のネットワーク容量を比較すると、バスレーン規制の導入によりすべての時間帯中

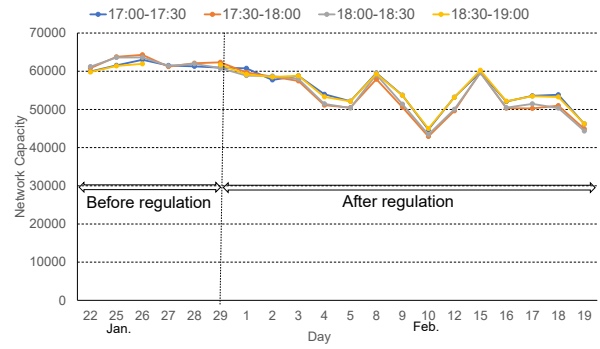
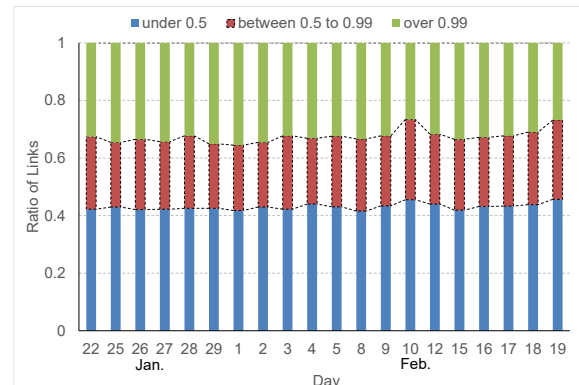
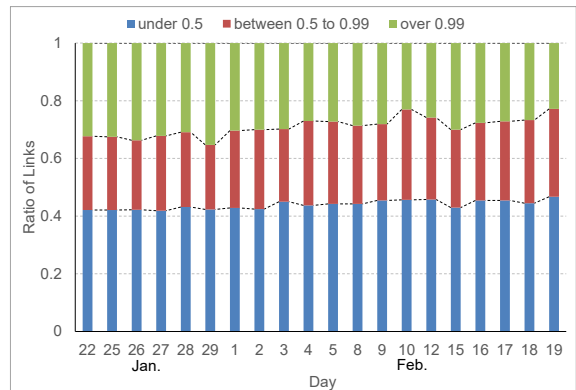


図-7 ネットワーク容量の推定値の推移



(a) 17:00~17:30



(b) 17:30~18:00

図-8 最大 OD 交通量が実現するときのリンク交通量の容量比の構成比率

のネットワーク容量が大幅に減少していることがわかる。これは、前節で示したようにバスレーン規制の導入により経路選択パラメータが低下したためであると考えられる。なお、本研究では経路選択パラメータは1日を通して変化しないと仮定して分析を行っているが、同一日でもバスレーン規制を実施している時間帯中と実施していない時間帯でも経路選択パラメータが異なる可能性があることに注意が必要である。

最後に、図-8に最大 OD 交通量が実現するときのリンク交通量の容量比の構成比率を示す。それぞれのリンクにおける「リンク交通量の容量比」は、 x_a^*/\tilde{c}_a (ただし、 x_a^* は最大 OD 交通量が実現するときのリンク交通量)と

して定義している。図を見ると、17:00～17:30 および 17:30～18:00 において、およそ 40%のリンクの容量比が 50%未満にとどまっていることがわかる。一方、ネットワーク容量が大幅に低下した 2 月 10 日と 2 月 19 日を除いて、交通量が容量に近いリンクの構成比率に関する日ごとの傾向は類似していることがわかる。

4. おわりに

本研究では、経路交通量と経路選択パラメータの同時推定モデルと、交通ネットワーク容量推定モデルの 2 種類のネットワーク解析手法を用いて、交通規制が道路利用者および交通ネットワークに及ぼす影響を評価した。

道路利用者の対応行動に関しては、バスレーン規制施策導入により混雑に関する不確実性が増加することを確認した。さらに、バスレーン規制導入によりバスレーンを含む経路の規制時間帯中の交通量が減少するものの、平行する経路の規制時間帯中の交通量は増加しなかったことから、バスレーン規制導入により、道路利用者は経路変更を行うのではなく、移動手段の変更や移動の取りやめ等の対応行動をとった可能性を示唆した。交通ネットワークに及ぼす影響に関しては、バスレーン規制導入後のネットワーク容量が大きく減少したことを確認した。さらに、ネットワーク容量が減少した要因は、規制による容量低下の影響に加えて道路利用者の不確実性に対する認知の変化が影響している可能性を示した。

今後の課題として、推定リンク交通量が 0 のリンクが存在したため、経路集合の生成に改良の余地があるといえる。経路列挙の必要のないマルコフ連鎖配分モデルと組み合わせる¹⁹⁾ことも考えられる。さらに、残留交通量を考慮することも必要であろう。最後に、本研究では経路選択パラメータをすべての時間帯で変化しないという前提のもと推定したが、時間帯ごとに推定した結果との比較を行う余地がある。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費 18H01562 の助成を受けたものである。また、交通量感知器データは宮崎県警より提供を受けた。

参考文献

- 1) Wong, S.C., and Yang, H.: Reserve capacity of a signal-controlled road network, *Transportation Research B* Vol. 31(5), pp.397-402, 1997
- 2) Kasikitwiwat, P. and Chen, A.: Analysis of Transportation network capacity related to different system capacity concepts, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 6, pp. 1439-1454, 2005
- 3) 赤松隆, 宮脇治: 利用者均衡条件下での交通ネットワーク最大容量問題, *土木計画学研究・論文集*, 12, 719-729, 1995
- 4) Sumalee, A., and Kurauchi, F.: Network capacity reliability analysis considering traffic regulation after a major disaster, *Networks and Spatial Economics*, 6, pp.205-219, 2006
- 5) 中山晶一郎, 高山純一: リンク交通量を用いた交通ネットワーク均衡問題のパラメータ推定: リンク相関を考慮した最尤法, *土木学会論文集 D*, Vol.62, No.4, 548-557, 2006
- 6) 中山晶一郎, 道下健二, 高山純一: 経路重複を考慮したネットワーク上での経路選択パラメータ推定法: リンクベースの最尤法, *土木学会論文集 D3 (土木計画学)*, Vol.68, No.5, I_741-I_749, 2012
- 7) 兵藤哲朗, 遠藤弘太郎, 萩野保克, 西隆太: Path Size Dial Logit モデルの提案とその適用可能性, *交通工学*, Vol. 44, 4, pp.66-75, 2009
- 8) 安藤正幸, 高山純一, 中山晶一郎: 交通流観測結果による Logit 型経路選択モデルの検証, *土木学会論文集 D3 (土木計画学)*, Vol.67, No.5, I_435-I_453, 2011
- 9) Yang, H., Meng, Q., and Bell, M. G. H.: Simultaneous estimation of the origin-destination matrices and travel-cost coefficient for congested networks in a stochastic user equilibrium, *Transportation Science*, 35(2), 107-123, 2001
- 10) Lo, H.P. and Chan, C.P.: Simultaneous estimation of an origin-destination matrix and link choice proportions using traffic counts, *Transportation Research Part A* 37, 771-788, 2003
- 11) 嶋本寛, 田之上直樹: 経路交通量推定モデルを用いた交通規制規制が自動車利用者の経路選択行動に及ぼす影響分析, *土木計画学研究発表会・講演集*, 61, CD-ROM, 2020
- 12) Chen, A., Chootinan, P. and Recker, W.: Norm approximation method for handling traffic count inconsistencies in path flow estimator, *Transportation Research Part B*, 43(8), pp.852-872, 2009
- 13) Shimamoto, H. and Kondo, A.: Semi-dynamic Markovian path flow estimator considering the inconsistencies of traffic counts, *Asian Transport Studies*, 6, 1000017, <https://doi.org/10.1016/j.eastsj.2020.100017>, 2020

(2021 3. 7 受付)

EVALUATION OF THE IMPACT OF TRAFFIC REGULATION ONTO DRIVERS' BEHAVIOR AND NETWORK CAPACITY USING TRANSPORTATION NETWORK ANALYSIS MODELS

Hiroshi SHIMAMOTO, Wataru HARAGUCHI and Koki HIGASHI