

状態空間モデルに基づく ハンプによる速度低減効果の評価

加藤 哲平¹・Nguyen Van Tung²

¹正会員 埼玉大学理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

E-mail:tkato@mail.saitama-u.ac.jp

²非会員 元 埼玉大学工学部環境社会デザイン学科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

生活道路における交通静音化を目的とした物理的なデバイスとして、ハンプが用いられている。ハンプの交通安全性評価および、適切なハンプ設置箇所の設定を目的として、ハンプからの距離に対する速度削減効果の分析が行われている²⁾。しかしながら、連続的に変化する車両速度に対して、その時系列的な関係を適切に表現した分析は行われていない。また、交通速度規制等の交通安全性向上施策の研究において、任意の速度以上の車両の生起確率といった評価指標が用いられている。本研究では、車両速度の時系列的な変化を考慮したベイズ統計学に基づく統計モデル(状態空間モデル)を構築する。構築したモデルを用いて、実データを用いてハンプからの距離に対する車両速度低減効果を分析し、ハンプによる交通安全性向上評価およびその設置方法に関する知見を示す。

Key Words : speed hump, traffic calming, safty analysis, bayes statics, state space modeling

1. 背景・目的

生活道路における交通安全性の向上を目的とした交通静音化に向けて、ハンプの導入が行われている。国内では、1980年代から研究の蓄積¹⁾が行われ、2001年の道路構造令改正によりハンプの導入が可能となってからは、様々な実証的な研究が行われている^{例えは2)4)}。

近年では、Rahamanら⁵⁾による研究でハンプからの距離に応じた車両速度に関する分析が行われた。具体的には、ハンプからある距離離れた位置における平均車両速度に対し、その位置の手前10mの車両速度および路線特性を変数とした回帰分析を行っている。これにより、ハンプからの距離に応じた速度低減効果の特性を明らかにしている。こうした研究成果は、ハンプ設置箇所や連続的にハンプを設置する場合の検討に対して応用可能であると言及されている。しかしながら、その分析は平均車両速度の推定に留まっており、そのバラつきに関する分析は十分になされていない。このため、危険であると考えられる車両速度を超える車両の生起確率といった、交通安全性を評価する上で重要な要因について分析可能なフレームワークではない。また、10m手前の車両速度の影響が考慮されているものの、連続的に変化する車両速度の時系列的な変化を十分に考慮できていないわけではない。

速度低減施策の評価において、ベイズ統計学に基づく統計モデルを用いた分析が、近年国外で行われている^{例えは6)8)}。これらの研究では、施策前後の車両速度の観測値に対する統計モデルを構築し、任意の速度以上の車両の生起確率を求め、求めた生起確率を用いて施策による交通事故削減確率を推定している。こうした分析を可能にしているのは、ベイズ統計学に基づく統計モデルが目標値の確率分布自体が推定可能であるという性質である。

本研究では、Rahamanら⁵⁾と同様に、ハンプ前後において連続的に観測した車両速度データから、ハンプからの距離に応じた車両速度の推定を行う。これに対し、ベイズ統計学に基づく統計モデルを用いることで、車両速度の確率分布自体を推定し、交通安全性を考える上でより実践的なアウトプット(例えば法定規制速度以上の車両速度を有する車両の生起確率等)を算出する。また、ある区間を走行する車両は連続的な挙動を示すため、その車両速度は時系列的に変化する。こうした時系列的な車両速度変化を考慮するために、状態空間モデルを用いる。このように、既存の研究で用いられていた分析手法に設けられた仮定を緩和することで、既に導入されたハンプによる交通安全性評価や、これから導入するハンプの効果的な設置方法等に関する知見を示す。

2. 分析手法

本研究では、連続的な車両挙動を考慮するため、状態空間モデルを用いた車両速度の統計モデルを構築する。状態空間モデルでは、観測不可能な“状態”から“観測”を通してデータが得られると想定する。状態は確率変数であり、一時点前の状態から確率過程を通して決定する。一方、観測は各時点で独立であり、観測誤差を有する確率的な事象である。本研究で扱うデータはハンプ前には減少傾向が、ハンプ後には増加傾向がみられる。こうした傾きを表現するため、本研究では状態を構成する変数としてその水準を表すレベル項とその傾きを表すトレンド項を導入する。また、本研究では個体差を表すランダム効果を想定する。ランダム効果は、各状態に対して追加的に与えられるようである。また、レベルおよびトレンドの遷移はガウス過程によるものと仮定し、観測誤差は平均が0の正規分布に従うものと仮定する。したがって、状態方程式は以下のように表される。

$$v(t, k) = v(t-1, k) + a(t, k) + \varepsilon_v(t-1, k) \quad (1)$$

$$a(t, k) = a(t-1, k) + \varepsilon_a(t-1, k) \quad (2)$$

where,

$$\varepsilon_v(t, k) \sim N(0, \sigma_v^2) \quad (3)$$

$$\varepsilon_a(t, k) \sim N(0, \sigma_a^2) \quad (4)$$

ここで、 k は観測地点を表し、 t はハンプからの距離（ハンプ手前100m, 50mやハンプ後10m 15mなどの離散値）を表す。 ε_v および ε_a はガウス過程による確率的な状態遷移を表し、その標準偏差はそれぞれ σ_v および σ_a で表されている。式(1)で示される状態に、個体差を表すランダム効果を付した値（確率変数）を平均値にもつ正規分布から観測データが得られるため、観測値は以下の確率分布に従う。

$$Y(t, n_k) = v(t, k) + r(n_k) + \varepsilon_Y \quad (5)$$

where,

$$\varepsilon_Y \sim N(0, \sigma_Y^2) \quad (6)$$

ここで、 n_k は観測地点 k における車両番号を表す。 ε_Y は観測誤差を表し、その標準偏差は σ_Y で表される。また、観測誤差は各地点において同一の分散を有する確率変数であると仮定している。ランダム効果については、特定の確率分布形を想定しているわけではないが確率変数である点に注意されたい。これにより、観測路線ごとの全体傾向を状態とし、それらに全ての t に対して同一の個体差（ランダム効果）が存在し、更に観測誤差がこれに付された形で観測値が得られていると仮定している。

(2) 推定手法

前節で示したような統計モデルのパラメータ推定では、

事後分布の最尤推定を行うために用いる推定量の計算において多重積分を行う必要があるため、計算自体に膨大な時間がかかったり、実質的に解析的な計算が困難となる。こうした複雑な統計モデルの推定に有効な手法として、**Marcov Chain Monte Carlo (MCMC)**法がよく用いられる。MCMC法は、データ分析において広く用いられるようになってきており、既によく知られた手法であるため、詳細については専門書^{例えは⁹⁾}に譲り、ここでは示さない。簡単に言えば、事前分布と（この場合は正規分布を仮定した）尤度関数から得られる事後分布から、推定するパラメータを観測値を所与としてサンプリングする手法である。ここで、事後分布からのサンプリングは通常容易ではないため、事後分布を定常分布に持つような**Marcov**過程を作り出す。このように**Marcov**連鎖と**Monte-Carlo**的な手法を組み合わせた手法が**MCMC**である。

3. データ分析

(1) データおよび分析概要

本研究では、ハンプが設置された生活道路計4地点（朝霞、北上尾、若葉、三吉）においてストーカーを用いた調査を行って得られたデータを用いる。このうち1地点のデータはRahaman^{ら⁹⁾}が用いたデータと同一である。データの取得方法等の詳細に関しては、Rahaman^{ら⁹⁾}を参照頂きたい。データについて、表-1にまとめる。なお、Rahaman^{ら⁹⁾}の論文に記載されている通り、地点1ではハンプ手前100mからハンプ後方80mまで観測されている。このように、使用したデータには観測範囲にばらつきがあるが、このうち共通する最小範囲であるハンプ手前80mからハンプ後方25mまでの観測データを使用する。

各地点のデータの基本的な特性を表-1に示す。なお、各地点におけるサンプル数は、地点1から順に、73, 97, 91, 89台である。表-1に示したように、各地点においてデータの特性が異なることが分かる。このため、各地点に対してレベル項・トレンド項を想定したモデリングを行った。各レベル・トレンド項は、道路特性（例えば幅員、歩行者数、車両数など）に依存すると考えられるが、本稿ではそうした変数をすべて総合した“地点特性”と考え、各地点ごとのレベル・トレンド項を推定している。道路特性を考慮した分析については、今後の課題としたい。また、ランダム効果については、各車両ごとに与え、その確率分布を推定する。

MCMCのサンプリング手法として、**Hamiltonian Monte Carlo**法を用い、このサンプリング手法の実行ソフトウェアである**stan**¹⁰⁾を用いて計算を行った。MCMCにおける**burn-in**におけるサンプリング数は2500、事後分布の推定に用いるサンプリング数は2500とした。各地点において、最初の観測点（ハンプ手前100m）における状態変

表-1, 使用したデータの情報

ハンブからの距離[m]		-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
地点 1	平均値[km/h]	30.2	31.4	32.4	33.1	33.2	32.4	31.2	29.7	27.9	25.9	23.9	21.8	19.7	18.0	19.5	21.2	23.1	24.8	26.3
	標準偏差[km/h]	7.1	7.1	7.0	6.8	6.5	6.4	6.3	6.2	6.0	6.1	6.2	6.4	6.8	7.1	6.6	6.1	5.5	5.1	5.0
	最大値[km/h]	54.2	53.2	51.9	51.0	49.9	47.9	47.7	46.9	45.8	45.2	44.8	43.9	43.5	42.1	42.5	42.9	42.4	42.0	41.6
	最小値[km/h]	19.0	20.0	20.7	20.0	19.2	19.8	20.0	17.5	16.8	15.0	13.6	11.9	9.6	6.9	9.0	12.0	14.7	16.3	17.7
地点 2	平均値[km/h]	38.8	39.3	39.5	39.5	38.9	37.9	36.6	34.9	32.8	30.1	26.8	23.3	19.7	16.6	17.1	17.8	17.2	15.4	13.1
	標準偏差[km/h]	5.9	5.7	5.5	5.5	5.2	5.2	4.9	4.8	4.6	4.4	4.4	4.6	4.8	5.3	4.1	3.0	2.6	2.7	2.5
	最大値[km/h]	53.2	52.9	52.0	51.3	50.1	49.6	48.0	46.6	43.5	40.4	38.5	35.9	33.7	30.6	28.0	26.3	23.0	23.3	19.1
	最小値[km/h]	23.4	22.7	24.0	23.8	27.7	24.4	22.8	20.1	18.7	16.9	16.4	13.9	10.8	7.7	10.3	11.9	11.0	10.3	8.4
地点 3	平均値[km/h]	35.5	35.8	35.7	35.3	34.6	33.5	32.3	31.0	29.2	26.9	24.3	21.3	18.2	15.6	17.8	20.2	21.1	19.5	16.1
	標準偏差[km/h]	5.5	5.7	5.6	5.6	5.4	5.2	5.0	4.7	4.5	4.4	4.5	4.5	4.6	5.1	4.2	3.4	3.1	3.2	3.6
	最大値[km/h]	49.3	51.0	50.9	49.6	48.5	47.2	45.4	42.7	39.4	37.6	36.6	35.2	33.9	33.3	32.6	31.1	28.8	28.2	26.5
	最小値[km/h]	20.5	21.0	21.0	20.8	20.4	20.0	19.8	19.0	18.2	16.9	14.6	12.3	10.2	7.1	9.1	11.2	11.8	11.3	8.9
地点 4	平均値[km/h]	40.0	39.7	39.4	39.1	38.6	37.8	36.6	35.0	33.1	30.8	27.6	23.4	18.5	15.0	16.4	17.7	16.8	14.1	10.8
	標準偏差[km/h]	7.3	7.1	6.8	6.4	6.1	5.7	5.3	4.9	4.6	4.6	4.6	4.5	3.9	4.0	3.0	2.5	2.7	2.5	1.6
	最大値[km/h]	59.8	58.9	56.9	55.5	54.3	53.3	50.0	47.7	45.4	43.2	41.7	36.8	29.7	25.5	24.6	24.5	23.0	20.0	15.0
	最小値[km/h]	26.9	22.7	23.0	25.8	25.9	25.3	24.7	24.5	24.0	22.0	19.3	13.6	10.8	6.6	10.9	11.9	10.0	9.7	7.6

数の事前分布には、無情報事前分布を用いた。また、各状態変数の遷移誤差および観測誤差の標準偏差の事前分布は0km/hから80km/hの一様分布とした。観測値の最大値がおおよそ60km/h未満であることから、このような事前情報は推定結果に不当なバイアスを生じさせる可能性は低いと考えられる。ランダム効果の事前分布は正規分布と仮定した。また、同一道路区間においてはある程度似通った傾向がある事を想定し、その分散に対して階層構造を仮定した。このため、同一道路区間上のランダム効果の標準偏差の階層事前分布を正規分布とし、この階層事前分布の標準偏差の事前分布（超事前分布）を0km/hから80km/hの一様分布とした。

MCMCにおける事後分布の収束に関しては、Rhat値を用いて判断する。Rhat値は、いくつかの異なるMarkov連鎖を比較することで計算できる値である。一つ以上のMarkov連鎖で事後分布が収束していない場合、すべての連鎖で収束している場合に比べて各連鎖間におけるサンプルの分散が大きくなる。この二つの分散の比がRhat値である。既存研究¹¹⁾に従い、Rhat値が1.10以下であれば事後分布が収束していると判断する。本研究で行った分析では、推定したすべての変数についてRhat値が1.02以下になった。なお、本研究では4つのMarkov連鎖を用いた推定を行った。

推定の妥当性（MCMCサンプリングの妥当性）に関しては、実行サンプルサイズを用いて判断する。各連鎖においてサンプル間の相関が大きいほどサンプリングの効率が悪化し、推定誤差が大きくなる⁹⁾。つまり、サンプル間の相関が大きいほど、妥当な推定を行うためには多くのサンプリングが必要となる。実行サンプルサイズの計算は算出することが困難であるが、本研究で推定に使用したrstanでは、実行サンプルサイズの推定値が計算できるため、これを用いて推定の妥当性を判断する。この値が推定したMarkov連鎖数の5倍（本研究の場合は

20) 以上であれば得られたサンプルにおいて十分に自己相関が消滅していると考えられている¹¹⁾。本研究で行った分析では、すべての変数においてこの値が381.62以上であったため、サンプリングが妥当であると考えられる。

(2) 推定結果

本研究で行った推定結果の一部について、次ページの図-1および表-2にまとめる。個体数が350存在するため、紙面の都合からランダム効果に関しては一部のみを示している。推定結果から、ハンブからの距離に対する車両速度および車両加速度の増減地が定量的に推定された。ハンブ前後において減速・加速が再現されていることから、推定結果はおおむね妥当であると考えられる。

(3) 交通安全性評価

推定したパラメータを用いて、ハンブからの距離に応じた30km/h以上の車両の生起確率の推定値を算出することができる。こうした指標を用いることで、定量的な交通安全性評価を行うことが可能となると考えられる。算出された生起確率を図-2に示す。図-2は車両特性別の生起確率をそれぞれ表している。車両特性は、(Veh, Passenger, Gender, Age)の4つのダミー変数として表現されており、それぞれ0の場合は（乗用車、歩行者無し、女性、若年者）、1の場合は（軽トラック、歩行者有り、男性、高齢者）となっている。車両特性別の生起確率に関しては、推定したレベル項とランダム効果を足し合わせてできる各車両の速度の確率分布を車両特性別に更に足し合わせてできる確率分布から算出した。この結果から、車両特性による交通安全性向上効果の定量的な評価が可能となる。ダミー変数自体を用いた回帰分析的な方法を適用した状態空間モデルの作成を行えば、より有用な知見を得られる可能性があるが、今後の課題としたい。

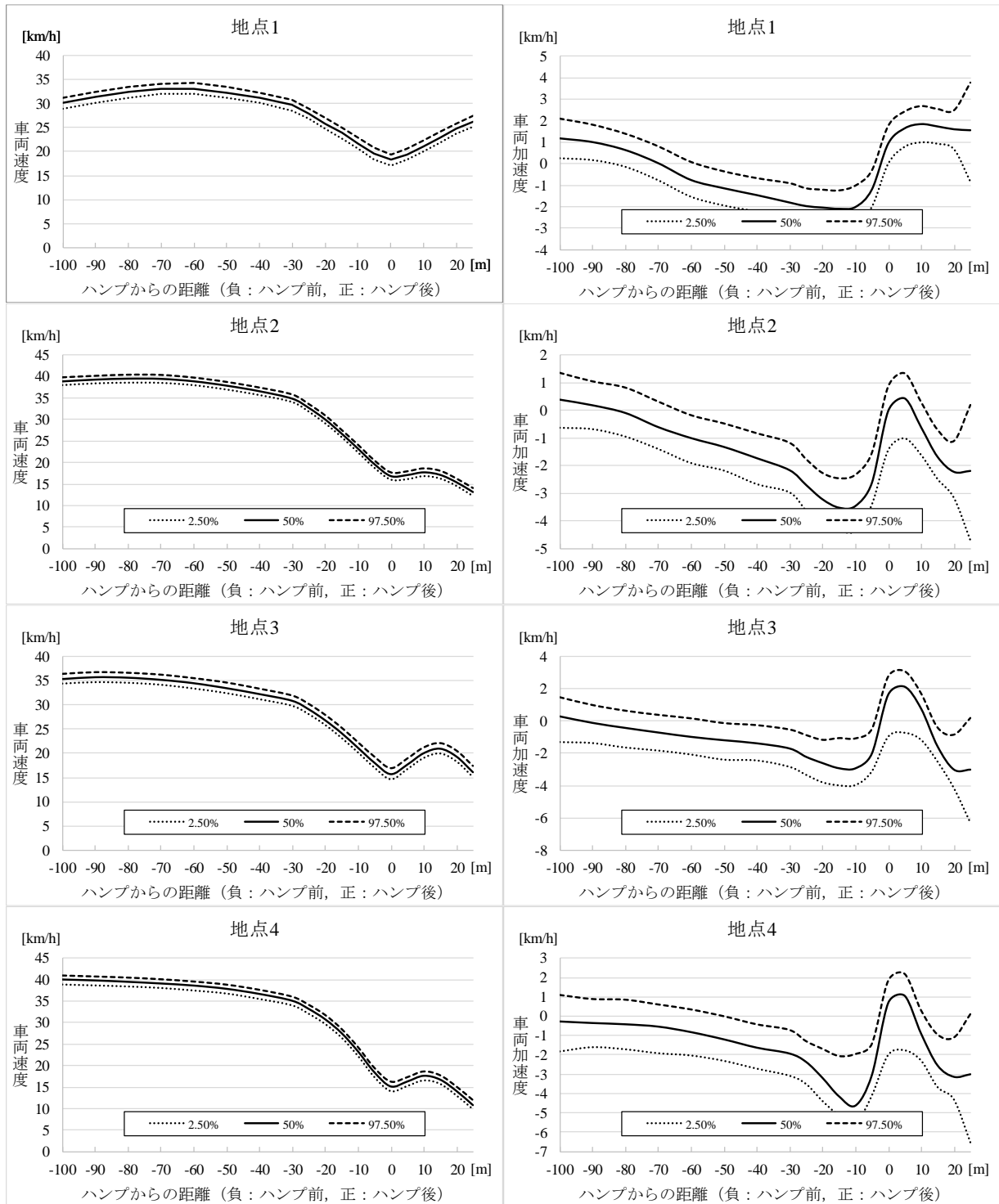


図-1, ハンプからの距離に対する車両速度・車両加速度の推定値

表-2, ランダム効果の推定値 (一部のみ)

車両番号	平均	標準偏差	パーセンタイル値			車両番号	平均	標準偏差	パーセンタイル値		
			2.50%	50%	97.50%				2.50%	50%	97.50%
1	-1.18	0.81	-2.67	-1.18	0.43	9	6.27	0.79	4.74	6.27	7.79
2	-0.80	0.81	-2.35	-0.79	0.75	10	-5.62	0.81	-7.09	-5.63	-3.99
3	-5.69	0.83	-7.32	-5.71	-4.16	11	-6.24	0.81	-7.75	-6.25	-4.64
4	-1.22	0.83	-2.77	-1.21	0.45	12	-8.36	0.81	-10.02	-8.32	-6.76
5	-4.51	0.82	-6.14	-4.50	-2.93	13	3.87	0.79	2.33	3.91	5.41
6	-3.62	0.82	-5.13	-3.63	-1.97	14	2.96	0.78	1.49	2.95	4.39
7	2.10	0.80	0.49	2.11	3.71	15	-0.48	0.80	-2.09	-0.47	1.03
8	3.14	0.81	1.59	3.15	4.70	16	-4.86	0.77	-6.38	-4.86	-3.38

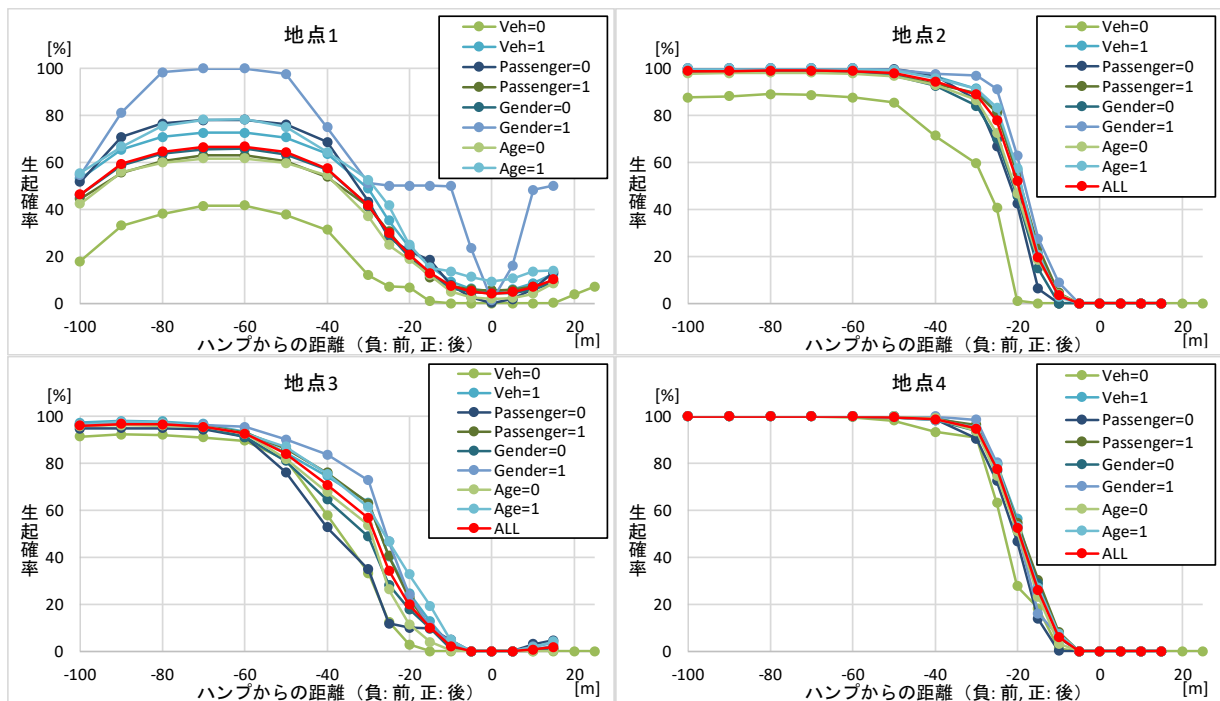


図-2. ハンプからの距離に対する30km/h以上の車両生起確率（車両特性別）

4. まとめ

本研究では、Rahamanら⁵⁾と同様に、ハンプ前後において連続的に観測した車両速度データから、ハンプからの距離に応じた車両速度を推定した。Rahamanら⁵⁾の研究とは異なり、ベイズ統計学に基づく統計モデルを用いることで、車両速度の確率分布自体を推定することが可能となった。このため、交通安全性評価において有用であると考えられる、任意の速度を超える車両の生起確率を推定することが可能となった。また、連続的に変化する車両速度の時系列的な特性を考慮するために、状態空間モデルを用いた統計モデリングを行い、より現実的な枠組みで車両速度データの分析を行うことを可能とした。

構築した分析フレームワークを実データに適用する事で、既に導入されたハンプの交通安全性向上効果を詳細に分析した。

謝辞：本研究で使用したデータは、筆者の所属する研究グループで長期間に渡って蓄積されてきたデータである。データ取得および実証実験に携わった皆様並びに地域住民の方々に対し、ここに記し深い感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 青木英明, 久保田尚, 新谷洋二: ハンプの研究 (その 1), 交通工学, Vol.19, No.2, pp. 10-18, 1984
- 2) 久保田尚, 坂本邦宏, 崔正秀, 武本東, 中野英明: ハンプの長期公道実験による有効性の検証-地区道路の事故多発交差点における安全性向上に関する実

験的研究-土木計画学研究・論文集, Vol. 21, pp.875-884 2004

- 3) 市原慎介, 吉田進悟, 小嶋文, 久保田尚: ハンプの短区間連続設置における周辺環境への影響および有効性の検証, 土木学会論文集 D3, Vol. 67, No.5, 2012
- 4) 吉田雅俊, 久保田尚: 交通調査データと住民意識の比較に基づくハンプの設置効果と課題に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol. 25, No.4, pp.971-978, 2008
- 5) Mursheda Rahman, Aya Kojima, Hisashi Kubota: Predicting Individual Vehicle Speed Profile of Urban Residential Streets where a Single Hump is Present Considering the Road Geometric Features, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.13, pp. 2137-2153, 2019
- 6) Shahram Heydari, Luis F. Miranda-Moreno, Fu Liping: Speed limit reduction in urban areas: A before-after study using Bayesian generalized mixed linear models, Accident Analysis & Prevention, Vol. 73, pp.252-261, 2014
- 7) Eun Sug Park, Jaebeom Park, Timothy J. Lomax: A fully Bayesian multivariate approach to before-after safety evaluation, Accident Analysis & Prevention, Vol. 42, No. 4, pp. 1118-1127, 2010
- 8) Karim El-Basyouny, Tarek Sayed: Measuring safety treatment effects using full Bayes non-linear safety performance intervention functions, Accident Analysis & Prevention, Vol. 45, pp. 152-163, 2012
- 9) 豊田秀樹: 基礎からのベイズ統計学 -ハミルトニアンモンテカルロ法による実践的入門-, 朝倉書店, 2015
- 10) Stan Development Team, Stan Modeling Language Users Guide and Reference Manual, Version 2.19.2
- 11) Gelman, A., Carlin, J. B., Stern, H. S., Dunson, D. B., Vehtari,

A., Rubin, D. B.: Bayesian Data Analysis (3rd ed.). CRC Press.
2013

(?)

Evaluation for effects of speed hump on speed reduction and on traffic safety by using state space model

Teppeï Kato and Nguyen Van Tung

This template is prepared for your preparation of manuscript for JSCE journals. It provides instructions: page layout, font style and size and others. If you replace the relevant text with your own by using “cut & paste,” you can make your manuscript easily.

The English ABSTRACT should be justified, leaving a 30 mm margin on the left and right sides. Font should be a 10-point Times-New-Roman. The length should be 300 words or less. It should be placed below the title and authors' names set in 12 pt, spacing a single line.