

冬季における路面条件の違いを考慮した 交通流パラメータの確率的推定

峪 龍一¹・本田拓海²・加藤哲平³・内田賢悦⁴・宗廣一徳⁵

¹正会員 北海道大学大学院工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

E-mail: r-tani@eng.hokudai.ac.jp

²非会員 鉄道・運輸機構 北陸新幹線建設局 (〒532-0003 大阪府淀川区宮原三丁目 5 番 36 号)

E-mail: honda.tak-51g3@jrtr.go.jp

³正会員 埼玉大学大学院理工学研究科 (〒160-0004 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

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

⁴正会員 北海道大学大学院工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

E-mail: uchida@eng.hokudai.ac.jp

⁵正会員 国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒地道路研究グループ 寒地交通チーム

(〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1 番 34 号)

E-mail: k-munehiro@ceri.go.jp

冬季の積雪寒冷地では、積雪量・気温・除雪の履歴に応じて、路面条件および路側の堆雪幅が変化する。冬季の各道路条件に応じて、交通流の特性が変化していることが予想される。積雪路面と非積雪路面を比較して、交通容量の平均とばらつきが変化することを報告する研究は一部存在するが、冬季の路面条件の段階的な変化に応じて、交通流の特性を確率的に検証する研究は見当たらない。本研究では、固定カメラで常時観測された動画データを用いて、各路面条件における交通流を規定するパラメータを確率的に推定する手法を提案する。速度と密度の関係、および流率と密度の関係をそれぞれ規定するパラメータを確率変数として推定することで、それぞれの確率的な性質を比較検討することが可能となる。札幌市内の道道で冬季に観測された交通データを用いて、手法の検証を行い、その結果を示す。

Key Words: traffic flow, hierarchal Bayesian model, image recognition

1. はじめに

交通観測から、交通流の基本図が変動することが広く知られている。変動の要因として、天候、可変制限速度、日照条件、時間帯、長期的要因などが挙げられている¹⁾。それぞれの要因を対象として、基本図の変動を分析する研究が行われている²⁾³⁾。

冬季の積雪寒冷地では、降雪が交通の障害となる。特に、路面に降り積もった雪が除雪によって、道路の側方に寄せられると、その雪が歩道、路肩を順に埋めて、次第に車道を圧迫する。道路管理者が除雪を行わなければ、道路空間が減少し、交通容量が低下すると考えられる。そのため、道路管理者は道路ネットワークの容量を確保するために、除雪を行う必要がある。除雪は交通量の少ない、夜間の限られた時間内で、限られた資源の下で行われることから、効率的な除雪計画が求められている。

効率的な除雪計画を立案するためには、道路ネットワーク内の各リンクにおける、降雪による交通障害の程度をあらかじめ認識できることが理想である。近年、プローブカーデータ、感知器データなどの交通観測データの利用可能性の高まりにより、時空間的に高い分解能で、各リンクの交通状態を認識しやすくなっている。降雪が原因となる、リンクの容量低下を交通観測データから、検出するためには、路面条件ごとの、交通流の基本図の特性の違いを認識する必要がある。本研究では、その基礎として、冬季の路面条件の変化に伴う、交通流の基本図の変動を明らかにすることを目的とする。

冬季の積雪寒冷地においては、積雪の影響により、交通流を規定するパラメータの平均のみならずばらつきもまた変化することが指摘されている⁴⁾。内田⁴⁾はマクロ交通流モデルから確率的交通容量を推定する手法を提案している。提案する手法の実証のため、無積雪時と積雪

時の札幌市内で観測された交通データを用いて、確率的な交通容量を推定した。

本研究では、冬季における積雪寒冷地の道路を対象として、道路の側方に寄せられた雪の幅（以下、堆雪幅）の段階的な変化に伴う、交通流の基本図を規定するパラメータの変化を明らかにする。なお、凍結の有無など、冬季の路面に関するその他の条件の違いについては、本研究では扱わないものとする。

本研究では階層ベイズモデルを用いて、堆雪幅ごとのパラメータを確率変数として推定するものとする。確率変数として推定することによって、堆雪幅の変化に伴う、パラメータの平均とバラつきの変化を表現することが可能となる。内田⁴⁾において、積雪時の交通容量は無積雪時と比較して、平均が小さくなり、不確実性（変動係数）が大きくなることが報告されている。しかし、この分析では、積雪時のある1日のみのデータを対象としているため、冬季の内における路面条件の違いは考慮されていない。本研究のように、路面条件ごとの、交通流の確率的な特性が変化することが明らかになれば、冬季の除雪計画および道路ネットワークにおける移動時間信頼性を考慮した道路管理においても有用であると考えられる。

本研究と同様に、交通流の確率的な性質に着目する研究がいくつか存在する。例えば、Qu et al.⁵⁾は観測結果のパーセンタイル値ごとに、交通流の基本図を描くための手法を提案している。この研究では、データの観測が渋滞領域より、自由流領域に偏ることが、推定結果に影響を及ぼすことを指摘し、これを緩和するための手法⁶⁾を適用している。この研究では、対象とするパーセンタイル値を外生的に指定して、そのパーセンタイル値に対応する交通流の基本図のパラメータを確定変数として推定しており、パラメータを確率変数として推定する内田⁴⁾の手法および本研究で適用する手法とは対照的である。

本研究の構成は以下の通りである。第2章では、本研究で使用する交通流観測データ、およびその特性を示す。第3章では、交通流のパラメータを確率変数として、ベイズ的に推定するモデルを示す。第4章では、第3章で定式化したモデルに基づいて、観測データを分析し、パラメータを推定した結果を示す。第5章では、本研究で提案したモデルを開発することの必要性と、モデルの性質、および今後の課題についてまとめる。

2. 使用するデータ

本研究では、札幌市の下手稲通（図-1）の片側2車線を対象に、路上に設置された定点カメラに録画された動画を分析した結果をデータとして使用する。以降の説明は、本研究と同じデータを使用した Munchiro et al.⁷⁾の内

容に基づいている。

各車線の幅員は3m、路肩の幅員は0.5mである。（図-2）観測は2016年11月17日から2018年2月27日までのいずれも冬季における、計47日間に観測されたデータを用いる。5分間に通過した車両の交通量および空間平均速度を計算した結果、1693個のサンプルが得られた。それぞれのサンプルに、離散的に観測された堆雪幅の情報が紐づけられている。（例：0m, 0.5m, 1m, 1.5m, 2m, 2.5m）それぞれの堆雪幅ごとの観測されたサンプル数は表-1の通りである。

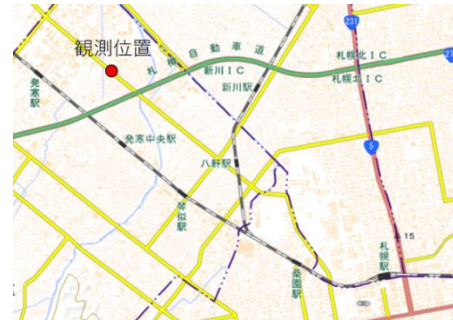


図-1 観測位置

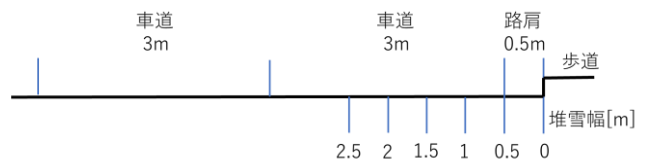


図-2 道路の横断面図

表-1 堆雪幅ごとの観測データ数

堆雪幅	サンプル数	堆雪幅	サンプル数
0m	84	1.5m	648
0.5m	300	2m	96
1m	456	2.5m	108

交通流の基本図より、5分間交通流率（以下、流率）と空間平均速度（以下、速度）から、観測対象の区間における交通密度（以下、密度）を計算する。堆雪幅ごとの速度と密度の関係をプロットしたものを図-3に示す。同様に、堆雪幅ごとの流率と密度の関係をプロットしたものを図-4に示す。表-1と図-3、図-4より、堆雪幅ごとに観測されるサンプル数にバラつきがあることに加えて、観測される密度が分布する領域にもバラつきがあることがわかる。堆雪幅が2m, 2.5mのときは、堆雪幅が1m, 1.5mのときと比べて、観測サンプル数が小さい。これは堆雪幅が大きくなると、ほどなく除雪されて堆雪幅が小さくなるためと考えられる。堆雪幅が小さいときには、容量に対して道路ネットワークの交通需要が小さいため、渋滞は発生せず、サンプルのほとんどが自由流に分類さ

れる。一方で、堆雪幅が大きいときには、大きな密度が観測される。図4では、堆雪幅が1mを超えると渋滞流が顕著に確認できる。

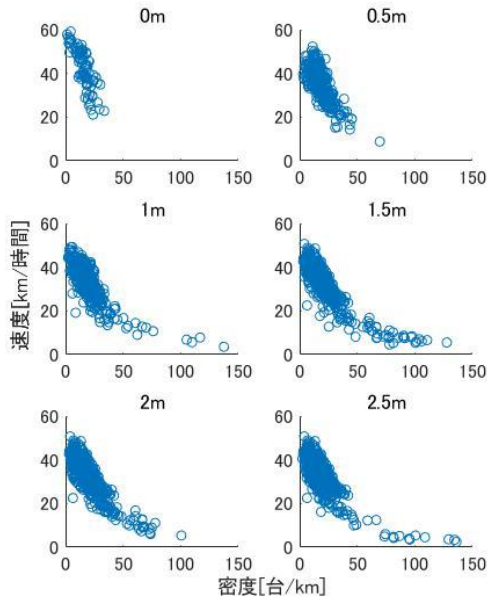


図-3 観測データ (密度速度関係)

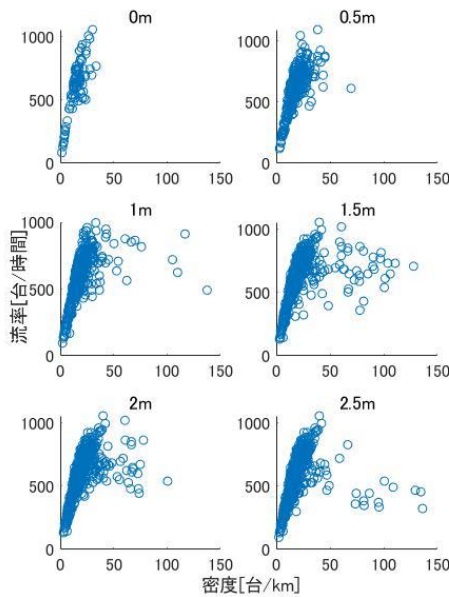


図-4 観測データ (流率密度関係)

堆雪幅ごとに、個別に交通流モデルのカリブレーションを行おうとすると、堆雪幅ごとのサンプル数の違いと、データが観測される領域の偏りが結果に影響することになる。例えば、堆雪幅が大きいときのサンプル量は、上述した通り、除雪の影響によって小さくなるおそれがある。小さい量のサンプルだけを使って、個別にパラメータを推定すると、サンプルのバラつきが推定結果に影響するおそれがある。しかし、堆雪幅ごとに、交通流モデ

ルのパラメータに違いはあったとしても、密度が大きくなるにしたがい、速度が低下するという、交通流における基本的な傾向は共通である。今回のような観測データに対しては、次章に示す階層ベイズモデルを適用することで、堆雪幅ごとのサンプル数が偏る問題に対処することができる。パラメータのカリブレーションにあたって、注目する堆雪幅が小さく、渋滞流の観測が得られない場合においても、その他の堆雪幅のサンプルも推定に用いることができるため、堆雪幅ごとに固有な、観測領域の偏りの問題にも対処することが可能となる。

3. モデル

本研究で使用する、基本図のパラメータを推定するモデルを本章で説明する。本研究では堆雪幅ごとのパラメータの異質性を考慮するため、階層ベイズモデルを適用して、パラメータを推定する。なお、事後分布を推定するにあたり、マルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC 法) によりサンプルを発生させて、統計量を計算する。以下、使用するモデルについて説明する。

(1) 記号

モデルで使用する記号は以下のとおりである。

N	サンプル数
I	離散区分された堆雪幅 i の数
k_0	飽和密度
v_i	堆雪幅 i における Greenberg 曲線のパラメータ
v_n	n 番目の速度のサンプル
k_n	n 番目の密度のサンプル
σ_v	v_n が生成される確率分布の分散
μ_{v_n}, σ_{v_n}	$v_{0,i}$ が生成される確率分布のパラメータ
q_n	n 番目の流率のサンプル
a_i	堆雪幅 i における自由流速度
b_i	堆雪幅 i における臨界密度
μ_a, σ_a	a_i が生成される確率分布のパラメータ
μ_b, σ_b	b_i が生成される確率分布のパラメータ

(2) 階層ベイズモデル

先述の通り、本研究では観測データの性質を考慮し、階層ベイズモデルを適用する。交通観測データへの階層ベイズモデルの適用例として、葛西⁸⁾はサグ部における車頭時間の縦断線形の影響を抽出している。

ここで、一般的な階層ベイズモデルの説明のため、観測により得られたデータを Y とおく。 Y を生成する確率分布を $p(Y|\theta)$ とすると、 θ はその確率分布のパラメータである。さらに θ を生成する確率分布 (事前分布) を $p(\theta|\kappa)$ とすると、 κ はその確率分布のパラメータである。

κ は超事前分布 $p(\kappa)$ によって生成される。事前分布を生成する超事前分布を設定することによって、すべてのサンプルを用いてパラメータを推定できるようになり、観測データの異質性および観測領域の非一様性をモデル内で考慮することができる⁹⁾。観測データ Y が与えられるとき、 θ と κ の同時事後分布は以下のように書ける。

$$p(\theta, \kappa | Y) = \frac{p(Y|\theta)p(\theta|\kappa)p(\kappa)}{\int \int p(Y|\theta)p(\theta|\kappa)p(\kappa)d\theta d\kappa}$$

ここで、上の式の右辺の分母は正規化定数である。上のような同時事後分布の統計量を解析的に求めることは困難である。そのため、MCMC法を用いたサンプリングによって、事後分布の統計量を計算する。これから以下に示す、2種類の統計モデルでは、上の説明における事前分布と超事前分布をそれぞれ示している。

本研究では、速度と密度の関係をGreenbergのモデル¹⁰⁾によって表現するものとする。パラメータの推定に用いた統計モデルは以下のとおりである。

$$v_n \sim N\left(v_{0,i(n)} \cdot \ln\left(\frac{k_0}{k_n}\right), \sigma_v\right) \quad \forall n = 1, \dots, N \quad (1)$$

$$v_{0,i} \sim LN(\mu_{v_0}, \sigma_{v_0}) \quad \forall i = 1, \dots, I \quad (2)$$

ここで、式(1)における $i(n)$ は n 番目のサンプルの堆雪幅が i のカテゴリであることを意味する。式(1)は n 番目に観測された、 v_n と k_n に対応する分布である。 v_n が式(2)から生成されるパラメータに基づき、正規分布から生成されることを表している。式(2)は堆雪幅ごとの曲線の差を表現するパラメータであり、対数正規分布から生成されることを表している。

次に、流率と密度の関係について述べる。本研究では三角形型のモデルを採用する。パラメータの推定に用いた統計モデルは以下のとおりである。

$$q_n \sim N(a_{i(n)} \cdot k_n, \sigma_q) \quad \text{if } k_n \leq b_{i(n)} \quad \forall n = 1, \dots, N \quad (3a)$$

$$q_n \sim N\left(-\frac{a_{i(n)} \cdot b_{i(n)}}{k_0 - b_{i(n)}} \cdot (k_n - k_0), \sigma_q\right) \quad \text{if } k_n > b_{i(n)} \quad \forall n = 1, \dots, N \quad (3b)$$

$$a_i \sim LN(\mu_a, \sigma_a) \quad \forall i = 1, \dots, I \quad (4)$$

$$b_i \sim LN(\mu_b, \sigma_b) \quad \forall i = 1, \dots, I \quad (5)$$

上記より、統計モデルは観測された密度と臨界密度の大小によって区分されている。式(3a)および(3b)は式(4)および(5)から生成されるパラメータに基づき、正規分布から生成されることを表している。式(4)および(5)は堆雪幅ごとの、自由流速度と臨界密度の異質性を表すパラメータであり、それぞれ対数正規分布から生成されることを表している。

4. 分析

(1) 設定

式(1)および式(3b)における飽和密度 k_0 は240[台/km]と設定する。式(1)から式(5)における、超事前分布に対応するパラメータはいずれも一様分布に基づく、無情報事前分布として設定した。

(2) 結果

表-2は階層ベイズモデルにより推定された、速度と密度の関係の各種パラメータの事後分布の平均と標準偏差を表している。なお、表-2のパラメータ $v_{0,i}$ 右側のかっこ内は下添え字の i に対応する堆雪幅を表している。パラメータ $v_{0,i}$ の平均は堆雪幅が大きくなるにしたがって低減する傾向にある。つまり、堆雪幅が大きくなることで、自由流速度が小さくなることがわかる。標準偏差は堆雪幅が0mから1.5mまで変化する過程では、漸減する一方で、堆雪幅が2mおよび2.5mのときは、標準偏差が大きくなる。

表-2 事後分布（速度と密度）の平均と標準偏差

パラメータ	平均	標準偏差
$v_{0,1}$ (0m)	14.68	0.18
$v_{0,2}$ (0.5m)	13.14	0.11
$v_{0,3}$ (1m)	12.60	0.08
$v_{0,4}$ (1.5m)	12.66	0.07
$v_{0,5}$ (2m)	10.57	0.21
$v_{0,6}$ (2.5m)	10.00	0.18

図-5は堆雪幅ごとに推定された速度と密度の関係を表す曲線の差異を表す。図-5の曲線は、堆雪幅のカテゴリが i であるときのGreenbergのモデルが、 $v_i = E[v_{0,i}] \cdot \ln(k_0/k_i)$ として表されるときに曲線に対応している。 $E[v_{0,i}]$ は表-2の結果を使用している。なお、 v_i と k_i は堆雪幅のカテゴリが i であるときの速度と密度である。

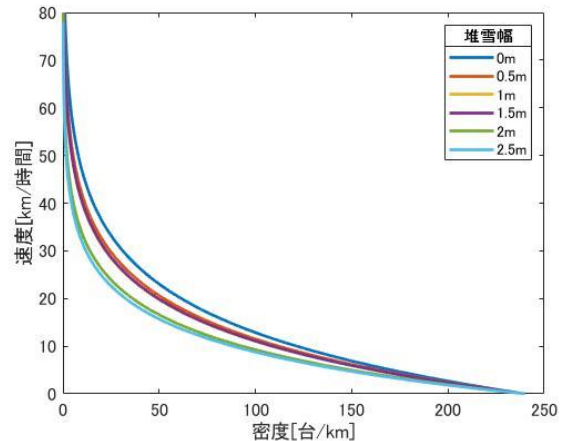


図-5 堆雪幅ごとに推定された曲線

表-3は階層ベイズモデルにより推定された、流率と密度の関係の各種パラメータの事後分布の平均と標準偏差を表している。自由流速度に対応するパラメータ a_i の平均は堆雪幅の増加に従って減少している。臨界密度に対応するパラメータ b_i は堆雪幅が0mから1mに増加する過程では、堆雪幅の増加にしたがって増加している。一方で、堆雪幅が1.5mから2.5mに堆雪幅が増加する過程では、堆雪幅の増加にしたがって減少している。

表-3 事後分布（流率と密度）の平均と標準偏差

パラメータ	平均	標準偏差
a_1 (0m)	45.37	1.46
a_2 (0.5m)	38.28	0.67
a_3 (1m)	36.07	0.42
a_4 (1.5m)	34.61	0.37
a_5 (2m)	30.82	1.25
a_6 (2.5m)	29.67	1.00
b_1 (0m)	16.81	0.74
b_2 (0.5m)	19.77	0.55
b_3 (1m)	20.83	0.36
b_4 (1.5m)	22.70	0.42
b_5 (2m)	21.60	1.14
b_6 (2.5m)	19.10	0.97

図-6は堆雪幅ごとに推定された流率と密度の関係を表す曲線の差異を表す。図-6の曲線は、堆雪幅のカテゴリーが i であるときの自由流速度と臨界密度がそれぞれ表-3の a_i と b_i の平均であるときの結果を表している。

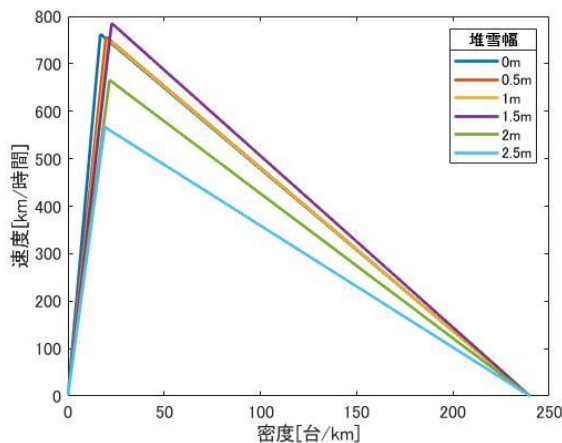


図-6 堆雪幅ごとに推定された曲線

5. まとめ

本研究では、階層ベイズモデルを適用した交通流のパラメータを確率的に推定する手法を示した。冬季の積雪寒冷地では、路面条件が段階的に変化して、交通の障害となる。本研究では、堆雪幅がそれぞれ変化したときの、交通流のパラメータが変化する関係を明らかにすること

を目的として、手法を提案した。提案する手法から得られる知見が、道路ネットワークの容量を確保できるような、効率的な除雪計画を立案する上での参考になることが期待される。

路面条件ごとの発生頻度にはバラつきがある。特に、走行条件が悪くなる条件は、すぐに除雪等の対策がなされるため、希少であり、観測機会も少ない。このような路面条件ごとの観測機会のバラつきを克服するため、パラメータの推定にあたって、階層ベイズモデルを適用した。これにより、各路面条件におけるパラメータの推定に必要なデータ数を多く確保できる。

札幌市内の道道で経時的に観測された動画データを用いて、提案する手法の検証を行った。堆雪幅が大きくなるに従い、交通流の基本図を規定するパラメータが段階的に変化する様子を確認した。

今後の課題として、路面条件、車両の走行位置の違いを分析において考慮することが挙げられる。特に、堆雪幅が大きくなるにしたがって、車両の走行位置は道路の中央に寄って移動する。堆雪幅に応じた、車両の走行位置の分布の変化が、交通流に与える影響を説明する手法を開発する必要がある。また、本研究の結果から、得られた交通観測データから、現在の堆雪幅を推定するための技術を開発することも課題である。本研究で推定した対象以外の、堆雪幅のカテゴリーの違いをよく説明できる指標を探索することなどが考えられる。

謝辞: 本研究の一部はJSPS 科研費 21K20440 の助成を受けたものである。本研究で使用したデータは国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所から提供いただいた。ここに深く謝意を表す。

参考文献

- 1) 塩見康博: 交通流基本図の変動特性について, 交通工学, Vol. 52, No. 4, pp.4-10, 2017.
- 2) Chung, E., Ohtani, O., Warita, H., Kuwahara, M. and Morita, H.: Does weather affect highway capacity?, Proceedings of 5th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service, 2006.
- 3) 日下部貴彦, 井料隆雅, 朝倉康夫: 車両検知器データを用いた交通流可視化技術の開発, 交通工学, Vol.43, No.4, pp.59-68, 2008.
- 4) 内田賢悦: 交通容量の確率的変動が道路ネットワークの移動時間に与える影響に関する研究, 土木学会論文集 D, Vol. 66, No. 4, pp. 431-441, 2010.
- 5) Qu, X., Zhang, J., and Wang, S.: On the stochastic fundamental diagram for freeway traffic: model development, analytical properties, validation, and extensive applications, Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 104, pp.256-271, 2017.
- 6) Qu, X., Wang, S., and Zhang, J.: On the fundamental diagram for freeway traffic: A novel calibration approach for

- single-regime models, Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 73. pp.91-102, 2015.
- 7) Munehiro, K., Nakamura, N., and Sato, M.: Variation of traffic flow due to accumulated snow formation on road, MATEC Web of Conferences, 2019.
- 8) 葛西誠, ドライビングシミュレータ追従積重ね試験と階層ベイズ法による縦断線形の影響の抽出, 土木学会論文集, Vol. 71, No. 5, pp. 1_917-1_929, 2015.
- 9) 伊庭幸人, ベイズモデリングの世界, 岩波書店, 2018.
- 10) Greenberg, H.: An analysis of traffic flow, Operations Research, Vol. 7, No.1, pp. 79-85, 1959.
- (?)

Stochastic Estimation of Traffic Flow Parameters Considering Differences in Road Condition

Ryuichi TANI, Takumi HONDA, Teppei KATO, Kenetsu UCHIDA,
and Kazunori MUNEHIRO

In cold snowy regions in winter season, road surface conditions and snow widths at the roadside change depending on the amount of snowfall, temperature, and snow removal history. The characteristics of the traffic flow also change depending on each road surface condition and snow width in winter season. Some studies have reported that the stochastic characteristics of traffic capacity changes between summer and winter seasons, but no study examines the characteristics of traffic flow depending on the road conditions in winter season. This study proposes a method to estimate the stochastic characteristic of traffic flow using video data. We adopted the stochastic estimation method, hierarchical Bayesian model with Markov chain Monte Carlo method. The proposed method is demonstrated using traffic data observed on a road in Sapporo city.