

# 積雪寒冷地域における冬季の路面状況が 交通流の確率的特性に及ぼす影響に関する分析

Analysis on the effects of stochastic property of traffic flow on the winter road condition in snowy-cold regions

北海道大学工学部  
北海道大学大学院工学院  
土木研究所 寒地土木研究所  
北海道大学大学院工学研究院

○学生員 本田拓海 (Takumi Honda)  
学生員 嶋龍一 (Ryuichi Tani)  
正員 宗広一徳 (Kazunori Munehiro)  
正員 内田賢悦 (Kenetsu Uchida)

## 1. はじめに

札幌市のような、2月の積雪深の最大値に関する累年平均が50センチメートル以上かつ1月の平均気温の累年平均が0度以下の地域は施行令で積雪寒冷地域と呼ばれており<sup>1)</sup>、冬季の降雪は住民の生活に様々な影響を与えている。特に道路上の積雪が交通に与える影響は大きく、道路の快適性や安全性の向上のため、各道路区間における積雪の状況を把握することは重要な課題のひとつと言える。しかし、札幌市のように人口規模が大きく、積雪寒冷地域に該当する都市は世界的に少ないため、信頼できる交通データ取得は限られている。したがって、積雪寒冷地域において、交通データを用いた交通流の観測を扱う研究は不足している。そこで、本研究では、除雪などの冬季路面管理を適切に行うため、交通流の確率的な特性を評価することを目的として、階層ベイズモデルを用いた交通データの確率的な分析を行う。

## 2. 使用データ

### (1)概要

ここでは本研究で使用するデータについて紹介する。データは国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所により観測されたものを使用する。観測は北海道札幌市西区発寒14条11丁目に位置する下手稲通りの北西から南東にかけての区間、二車線を対象に行われた。対象とする車道幅員は走行車線、追い越し車線ともに3m、路肩の幅員は0.5mである。道路上に定点カメラを設置し、録画された映像から通過したすべての車両の走行速度、車種、走行位置、各時刻における堆雪幅(図-1)、乾燥・凍結・圧雪などの路面状況のデータが観測されている。速度が0km/hもしくは90km/h以上のデータは外れ値として速度集計から除外されている。観測は積雪が期待される冬季のみ行われ、2016年11月17日から2018年2月24日までに当該区間を通過した、合計81993台分のデータが得られた<sup>2)</sup>。

### (2)データ整理

本研究ではまず上記の交通データの整理を行った。前述のデータを5分ごとに分け、交通量・空間平均速度・交通密度を計算した。交通量に関しては5分間に通過した車両の台数を12倍することによって、時間交通量を推計した。空間平均速度に関しては5分間に通過した車

両の速度の調和平均から推計した。交通密度に関しては直接測定することは難しいため、本研究では交通量と速度の関係から間接的に推計した。次に、堆雪幅に着目し、これらのデータを堆雪幅0m、0.5m、1m、1.5m、2m、2.5mの6つに分類した。この過程で、81993台分のデータは合計1693個のデータに整理された(表-1)。

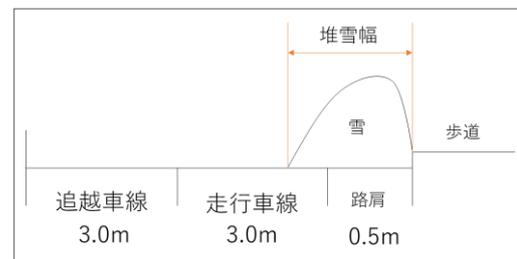


図-1 堆雪幅

表-1 整理されたデータの例

速度	交通量	密度	積雪id
39.3	540	13.7	1
36.1	864	23.9	1
38.4	660	17.2	1
34	744	21.9	1
35.7	984	27.6	1

## 3. Fundamental Diagram

本章ではマクロ交通流モデルにおける Fundamental Diagram について説明する。桑原(2020)では、「交通流率  $q$ 、交通密度  $k$ 、速度  $v$ の間には  $q=k \cdot v$  という常に満足すべき関係に加えて、経験的な観測によって得られる関係があり、これを Fundamental Diagram という。」と定義されている<sup>3)</sup>。ここで、交通流率は時間交通量を意味する。狭義では流率と密度の関係のみを指すこともあるが、本研究では流率・密度関係、速度・流率関係、速度・密度関係すべてを Fundamental Diagram として扱うものとする。典型的な Fundamental Diagram (流率・密度関係)の形状は図-2に示す三角形型のものであり実証的にその近似の妥当性が確認されているだけでなく、理論的にも扱いやすいため、動的な交通流を対象とする研究においてよく用いられている<sup>4)</sup>。

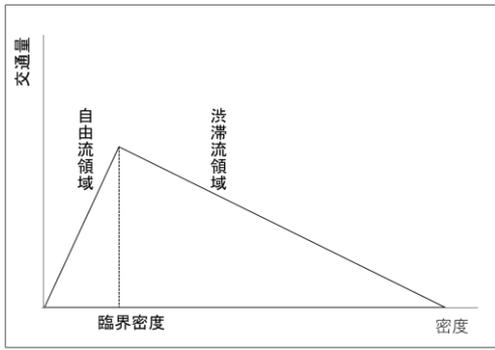


図-2 三角形近似された流率密度関係

その他にも Fundamental Diagram には Greenshields model、Greenberg model などのモデルが提案されている。例えば、Greenberg model は係数 ( $\alpha$ ) と交通密度の最大値 ( $k_{jam}$ ) を用いて以下のように表される<sup>3)</sup>。

$$v = -\alpha \cdot \log\left(\frac{k}{k_{jam}}\right) \quad (1)$$

$$q = -\alpha \cdot k \cdot \log\left(\frac{k}{k_{jam}}\right) \quad (2)$$

$$q = k_{jam} \cdot \exp\left(-\frac{v}{\alpha}\right) \cdot v \quad (3)$$

$q=k \cdot v$  の関係から得られた交通観測データの散布図を図-3、図-4、図-5 に示す。それぞれ密度・速度関係、流率・密度関係、流率・速度関係を表している。ここでは堆雪幅が 0m、1.5m、2.5m のデータのみ図示した。

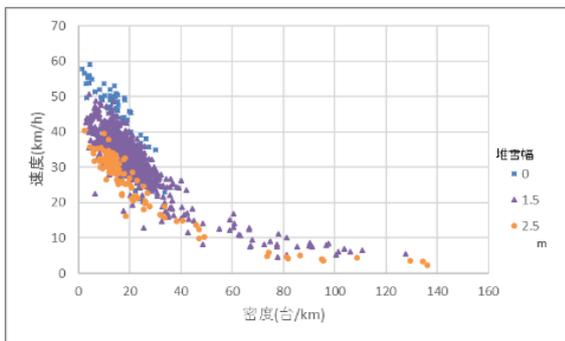


図-3 密度・速度関係 (下手稲通り)

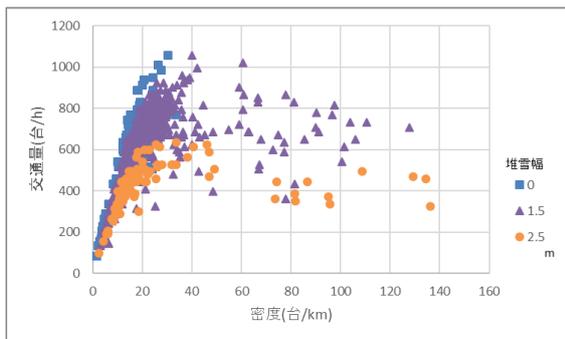


図-4 密度・交通流関係 (下手稲通り)

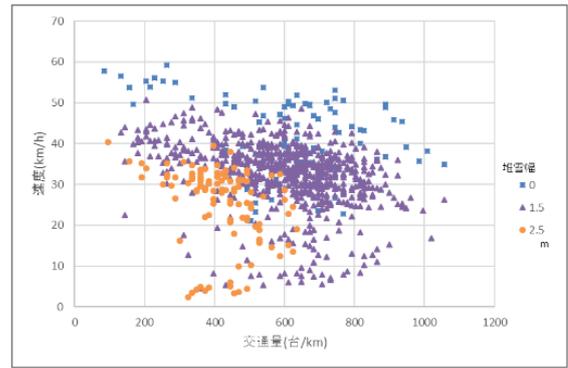


図-5 交通流・速度関係 (下手稲通り)

1 時間に通過しうる最大の車両台数を交通容量と呼ぶが、堆雪幅が大きくなると交通容量が小さくなり、全体の Fundamental Diagram の形も変化していることが分かる。

#### 4. 階層ベイズモデル

##### (1) ベイズ統計

Fundamental diagram のパラメータを確率的に推計するため、本研究では階層ベイズモデルを用いる。はじめに、ベイズ統計について説明する。ベイズ統計とはベイズの定理に基づいた統計方法である。ベイズの定理はトーマス・ベイズによって発見された定理であり、一般に確率および条件付き確率に関して、事象  $A$ 、 $B$  を用いて  $P(A) > 0$  のとき次が成り立つ<sup>5)</sup>。ここで  $P(A)$  は事象  $A$  が起こる確率である。

$$P(B|A) = \frac{P(A|B) \cdot P(B)}{P(A)} \quad (4)$$

ベイズ統計ではすべてのパラメータが確率変数として記述される確率分布を取り扱う。これによって、「確率分布のパラメータ  $\theta$  の値が区間  $[a, b]$  にある確率は 95% である」という表現ができるようになる。つまり、パラメータが確率分布として計算されるので、データのばらつきを解析結果に反映させることができる。本研究においては積雪の状態が交通流の信頼性に与える影響を推計することができる。 $\theta$  を確率分布のパラメータ、 $Y$  を観測により得られたデータとする。ベイズ統計ではデータが得られた後の分布として、 $P(\theta|Y)$  を事後分布、データが得られる前の  $P(\theta)$  を事前分布と呼び、それらには(5)式に示す関係が成立する。

$$P(\theta|Y) = \frac{P(Y|\theta)P(\theta)}{P(Y)} \propto P(Y|\theta) \cdot P(\theta) \quad (5)$$

$P(Y|\theta)$  は「 $\theta$  のもとで  $Y$  が生じる確率」であり尤度関数、または単に尤度と呼ばれる。すなわち、事後分布  $P(\theta|Y)$  は事前分布  $P(\theta)$  と尤度  $P(Y|\theta)$  の積に比例することを式(5)は示している。この式を用いて確率分布を更新することで、求める確率分布を得ることができる。このような、ベイズ統計における確率分布の更新をベイズ更新と呼ぶ。

式(5)において、 $P(Y)$ は観測されたデータ $Y$ にのみ依存し、 $\theta$ には依存しない定数である。すなわち、 $P(Y|\theta) \cdot P(\theta)$ が $\theta$ の分布の形を作り、 $P(Y)$ は正規化定数と見なすことができる。正規化定数とは、ある関数の和や積分が1になるよう、すなわち確率分布の条件を満たすように、その関数に掛けられる定数のことである。一般に $P(Y)$ は容易に求まらない。そこで、事後分布の数値計算にあたっては、 $P(Y)$ は考慮せず、 $P(Y|\theta) \cdot P(\theta)$ から乱数サンプルを多数発生させて、事後分布を数値的に求める。本研究では乱数サンプルを効率的に発生させるため、マルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC) を用いる。

また、ベイズ統計ではすべてのパラメータは確率分布に従うため、事前分布を設定する必要がある。事前分布の選び方は解析者に委ねられるが、パラメータの値について深い知識や経験がない場合、解析の再現性を低下させる可能性が高い。ここで、事前分布として平均 0、標準偏差 100 の非常に平らな正規分布を設定する事があり、これを無情報事前分布と呼ぶ<sup>6)</sup>。本研究においても特に言及のない限り無情報事前分布を用いる。

(2)階層ベイズモデル

ベイズ統計を階層的に考えたものが階層ベイズモデルである。式(5)のパラメータ $\theta$ がさらに別のパラメータ $\mu$ の関数である状況を考える。このとき、 $\mu$ はハイパーパラメータと呼ばれる。事前分布 $P(\theta)$ は確率分布であるから、条件付き確率の定義  $P(A,B) = P(A|B) \cdot P(B)$  より、式(5)は次のように展開できる。

$$P(\theta, \mu|Y) \propto P(Y|\theta) \cdot P(\theta|\mu) \cdot P(\mu) \quad (6)$$

ここで、 $P(\theta|\mu)$ は「 $\mu$ が与えられたときの $\theta$ の事前分布」を意味する。すなわち、 $\theta$ の事前分布の形が $\mu$ によって変化するという意味を意味する。さらに $\mu$ に関する事前分布も考慮しているため、事前分布に関して、二層の階層構造を持っていると見ることができ、階層ベイズモデルと呼ばれる<sup>7)</sup>。

観測により得られたデータ ( $Y$ ) と確率分布のパラメータ ( $\theta, S, \mu, \sigma$ ) を想定して、階層ベイズモデルの例を以下に示す<sup>8)</sup>。ここで、データ $Y_i$ および確率分布のパラメータ $\theta_i$ はそれぞれ条件 $i$ によって区別されている。また、データおよび事前分布のパラメータはそれぞれ正規分布に従うものとする。

$$Y_i \sim \text{Normal}(\theta_i, S_i) \quad i = 1, \dots, N \quad (7)$$

$$\theta_i \sim \text{Normal}(\mu, \sigma) \quad i = 1, \dots, N \quad (8)$$

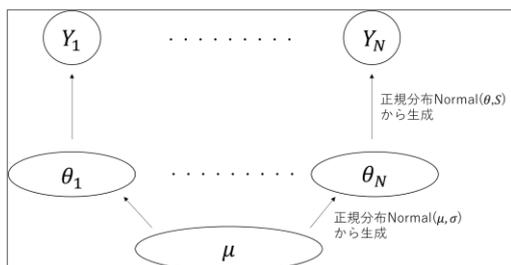


図-6 階層ベイズモデルの例のグラフィカルモデル

MCMC を用いた計算により、パラメータ $\theta_i, S_i, \mu, \sigma$ は同時に推計される。階層ベイズモデルの特徴は、各条件に属するデータに共通する事前分布 $\mu$ を想定しているため、各条件のデータを総合した、データ全体の傾向を各条件に対応する確率分布 $\theta_i$ に反映させることができる点である。したがって、たとえ一部の条件において観測されたデータの総数が少なくても、その他の条件で観測されたデータを用いて、確率分布を推計することが期待できる。本研究で用いるデータについても、渋滞領域や堆雪幅が大きい条件においては、観測されたデータ数が少ないことから、階層ベイズモデルを適用することが有用である。

本研究では、 $Y_i$ は速度、密度、交通量などの観測データ、 $\mu$ は堆雪幅に関係しない推定曲線に共通する特徴、 $\theta_i$ は堆雪幅が $i$ と観測されたとき、そのことが推定する曲線に与える堆雪幅に固有な影響を表すと解釈できる。

5. まとめと今後の課題

本稿では、まず、札幌市で観測された交通データの整理を行い、各種 Fundamental Diagram に対応する散布図を示した。次に、階層ベイズモデルを積雪寒冷地域における冬季交通観測データに適用することについて考察した。

今後、統計ソフト R および統計パッケージ Stan を用いて、今回示した統計モデルを使った Fundamental Diagram のパラメータの推計を進める。推計にあたっては、Fundamental diagram のモデルの適切な選択 (例えば、Greenberg model ; 三角形モデル、図-1) 、確率分布の適切な選択を検討する見込みである。また、観測されたデータを堆雪幅ごとでなく、乾燥・凍結・圧雪などの路面状況ごとに分類してプロットを行ったところ、これらの路面状況の違いも交通流に影響を与えている可能性があることが分かった。こちらの推計についても同時に検討を進める。

参考文献

- 1) 積雪寒冷特別地域における道路交通の確保に関する特別措置法施行令 第一条
- 2) 国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所「平成 29 年度 路肩堆雪の形成と交通流に関する分析業務」
- 3) 桑原雅夫: 交通流理論, 交通工学研究会, 2020
- 4) 和田 健太郎: 交通流の Kinematic Wave モデルの解析法, 2017, <https://www.sk.tsukuba.ac.jp/~wadaken/PDF/JS-TE/KWM-VT.pdf>
- 5) 馬場真哉: R と Stan で始めるベイズ統計モデリングによるデータ分析入門, 講談社, 2019
- 6) 松浦健太郎: Stan と R でベイズ統計モデリング, 共立出版, 2016
- 7) 深澤圭太・角谷拓 (2009): 始めよう!ベイズ推定によるデータ解析, 日本生態学会誌 59,167-170
- 8) 8 行のデータで理解する階層ベイズ, 2019/12 <https://qiita.com/aoki-h/items/b8281823146b0e6c3ac2>