

令和 6 年 5 月 26 日現在

機関番号：10101

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2023

課題番号：21K20440

研究課題名（和文）自然災害による路面状態の不確実性を考慮するネットワーク規模交通状態推定手法の開発

研究課題名（英文）Development of network-scale traffic state estimation method considering the uncertainty of road condition caused by natural disaster

研究代表者

峪 龍一（Tani, Ryuichi）

北海道大学・工学研究院・助教

研究者番号：80908426

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では自然災害による路面状態の変化に伴って道路ネットワークの走行性能が変動するときに、道路ネットワークの走行性能をネットワーク規模で推定するための技術を開発した。第一に、冬の路面状態ごとに交通流特性が変動することに着目し、堆雪幅ごとのリンク交通容量を推定する方法を提案した。札幌市で観測されたデータを用いてこれを実証した。第二に、時空間的に不完全に観測されるネットワーク規模の交通観測データの利用を前提として、ネットワーク規模で交通状態を確率変数として推定する手法を提案した。観測データの不足を克服するために、均衡配分モデルによって制約された最尤推定問題として提案手法を定式化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の意義は、天候や気候条件といった道路環境の違いを考慮して、道路の走行性能指標の確率的な特徴を明らかにする手法を開発した点と、道路利用者の経路選択行動を考慮した上で、道路ネットワークレベルの交通状態を推定する手法を開発した点である。前者について、道路環境の違いによって道路リンクの交通容量の確率的特性が変化することが定性的に説明されてきたがこの変化を定量的に説明する手法を開発した。後者について、地方のように高密度・高頻度な交通観測が実現できない地域では、観測データから交通状態を統計的に推定するのが難しい。そこで、観測機会の不足を均衡配分モデルの利用によって補う最尤推定モデルを開発した。

研究成果の概要（英文）：This study developed a methodology to estimate the driving performance of a road network considering the fluctuation of the driving performance of a road network depending on the change in the road conditions caused by natural disaster. Firstly, focusing on the fluctuation of the traffic flow characteristics depending on the winter road conditions, we proposed a method to estimate a stochastic link capacity depending on the snow width. The model was verified by using the data observed in Sapporo city. Secondary, assuming the usage of the network-scaled traffic data observed incompletely and spatiotemporally, we developed a method to estimate network-scaled traffic states as a multivariate random variable. The proposed model is formulated as a maximum likelihood problem constrained to the equilibrium model to overcome the data shortage.

研究分野：交通計画

キーワード：冬期道路管理 交通状態推定 均衡配分

## 1. 研究開始当初の背景

道路交通を日々観測すると、道路の需要側（交通需要、交通量など）と供給側（自由走行速度、リンク交通容量など）の双方が日々そして時々刻々と変動していることがわかる。交通状態を観測するために交通感知器を設置したり、ETC2.0のような車両の軌跡データを観測・取得する仕組みがつくられたりしてはいるが、交通感知器の設置個所は財政的な制約によって限定され、軌跡データを取得できる車両数は限られている。そのため、道路ネットワークのすべてのリンクの交通状態を全時間帯にわたってリアルタイムに観測あるいは将来予測することは物理的に不可能である。通常、道路利用者は交通行動の開始前に道路ネットワークに関する完備された情報にアクセスできない。道路ネットワーク中の交通状態を部分的に記述する情報にアクセスできたとしても、道路利用者が入手できる情報の範囲は限定され、その精度も不確実である。道路利用者は限られた範囲の不確実な交通状態を前提として、経路選択・出発時刻選択にかかる意思決定を日々行っている。

既往の交通状態観測を対象とする研究では、観測データの不足と分析技術の限界を背景として、道路の性能指標（例えば、リンク交通容量など）を確定的に推定する手法が多く開発されてきた。本来は同時時間帯で日々観測あるいは同じ日の異なる時刻ごとで観測された交通データは集計するとばらつくことから、道路の性能指標は本来確率変数として表されるはずであるが、既往の多くの研究では性能指標の平均値を代表値として扱って、交通状態を推定する手法が議論されてきた。

しかし近年、交通観測技術の発展によって、大量の交通ビッグデータを道路ネットワーク規模で容易に観測できるようになってきた。多くの交通観測データが入手可能になったことで、交通現象の確率的な特性を分析するための環境が整備されてきた。これに応えるように、道路ネットワークの不確実性を確率変数として定量化するための方法論を開発する必要性が高まっている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は道路ネットワークにおける需要と供給の不確実性、特に道路ネットワークの走行性能を確率変数として推定する技術を開発することである。道路リンクレベルと道路ネットワークレベルの2つの段階でそれぞれ技術開発を行う。本研究の具体的な目的として以下の2点を設定した。

- 道路リンクレベルで、路面状態と道路リンクの走行性能（リンク交通容量等）との間の確率的な関係を明らかにすること。さらに、路面状態ごとの道路リンクの走行性能を確率変数として推定する手法を開発すること。
- 道路ネットワークレベルで、交通観測データを用いて、交通状態を推定する手法を開発すること。特に、高密度・高頻度な交通観測を前提とせず、部分的に観測された交通観測データを用いて、交通状態を推定する手法を開発すること。

## 3. 研究の方法

以下に研究方法を研究課題別に説明する。

(1) 2.における第一の目的（道路リンクレベルで路面状態と道路リンクの走行性能の関係を明らかにすること）を実現するため、まず道路リンクの路面状態ごとの交通流の特性（流率密度関係）の変動を定量的に調べた。冬期の札幌市内の道路で継続的に観測された走行車両の動画データから整理された局所的な交通流データを用いて、路側の堆雪幅ごとに流率密度関係がどのように変化するかを調べた。堆雪幅ごとに観測されたサンプル数にばらつきがあるため、階層ベイズモデルを用いて、流率密度関係を規定するパラメータを確率分布として推定した。流率密度関係を規定するパラメータの平均のみならずそのバラつきも定量化することで、路側の堆雪幅ごとの流率密度関係の確率的な変化を調べた。

(2) (1)で路側の堆雪幅と流率密度関係の確率的な関係が存在することがわかったことを受けて、交通観測データ（交通流データ）から、路側の堆雪幅を推定するための手法の開発を行った。観測された交通流データから路側の堆雪幅を分類する確率に至るまでの過程をベイズ統計に基づいてモデリングした。交通流データ、流率密度関係を規定するパラメータ、路側の堆雪幅の分類確率、およびそれぞれの確率変数間の関係をそれぞれベイズ統計に基づいて定義した。

(3) 上の2つの研究では、路面状態と交通流の動的な特性に焦点を当てていた。(3)では静的な均衡配分モデルの利用を前提とした、交通流を規定するパラメータを確率変数として推定する手法を提案した。静的な均衡配分モデルではリンク交通量とリンク移動時間の関係を表現するためにBPR関数と呼ばれる、両者の関係を多項式近似した関数が用いられることが多い。このBPR関数を規定するパラメータ（リンク交通容量など）を確率変数として推定する手法を提案した。

(4) 2. における第二の目的(道路ネットワークレベルで交通状態を推定するモデルを開発すること)を実現するため、均衡配分モデルによって制約された最尤推定モデルとして、交通状態を推定するモデルを開発した。1. で述べたように、スマートフォンのようなGPS測位機の汎用化やモバイル通信技術の発展により、近年は交通ビッグデータが容易に取得できる技術的な環境が整ってきた。しかし、人口密集地域である首都圏のように、高密度・高頻度な交通観測が可能な地域では、機械学習技術等の統計的なアプローチに基づく交通状態の推定が可能である一方で、地方部に代表される道路ネットワークの規模に比して交通需要が小さい地域では、交通観測が低密度・低頻度となり、統計的なアプローチに基づく交通状態の推定が困難となる。そこで、部分的に観測された交通データを利用しつつ、観測から漏れた箇所の交通状態を均衡配分モデルによって補うアプローチを採用した。つまり、道路利用者の規範的な経路選択行動を仮定することによって、部分的に観測された交通データから、道路ネットワーク全体における道路利用者の経路選択行動を推定し、その経路選択行動をもとに交通データが未観測な箇所の交通状態を推定する。

#### 4. 研究成果

3. で示した(1) - (4)の各研究方法に対応する形で以下に研究成果をそれぞれ示す。

(1) 冬期の札幌市内において観測された堆雪幅別の流率と密度のデータ(図1)をみると、堆雪幅ごとにサンプル数にばらつきがあることがわかる。堆雪幅ごとのデータをもとに、階層ベイズモデルを適用して、自由走行速度と臨界密度をそれぞれ推定したところ、堆雪幅が大きくなるに従い、自由走行速度が減少し、臨界密度が低下することが分かった。堆雪幅ごとの流速と密度の関係を調べるため、同様に Greenberg モデルのパラメータを階層ベイズモデルによって推定すると、図2のように流速と密度の曲線が推定された。

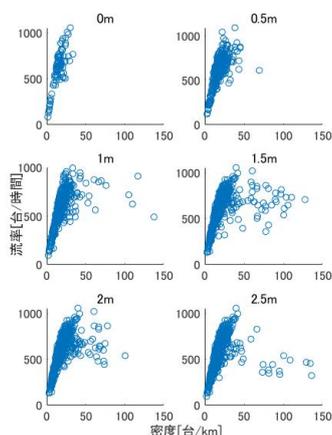


図1 堆雪幅別の流率と密度の観測データ

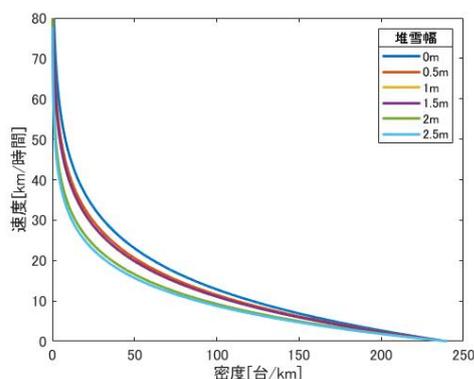


図2 堆雪幅ごとの流速と密度の関係

(2) ベイズ推論に基づき、堆雪幅を確率的に予測するモデルを提案した。まず、観測データを記述する同時分布をモデル化し、これをもとに堆雪幅の推定モデルを予測分布として定式化した。本モデルの特徴はモデル中の各種変数の分布形を特定し、変数間の共役性を利用することによって予測分布を解析的に導出したことである。確率的なアルゴリズムが必要なモデルと比較して、計算量は相対的に小さい。導出したモデルは交通状態をリアルタイムに推定する際には有効である。一方で、推定の精度を向上させたいときには、各種変数の分布形にかかる仮定を緩和して、確率的なアルゴリズムを導入することも可能である。図3はベイズ統計モデルのグラフィカルモデルである。本研究では堆雪幅と流率、密度がそれぞれセットで観測されているとき、これらの過去の観測データをもとにベイズ統計モデルのカリブレーションを行い、新規に観測された流率と密度のデータから堆雪幅を表す確率分布を求める。図4は堆雪幅ごとの流率と密度を自由流領域に着目して分析したものである。図4の左は自由流領域における流率と密度をプロットしたものである。堆雪幅が大きくなると自由流速度が低下する傾向がみとれる。これに対応して、図3のモデルに基づき、堆雪幅の予測分布を可視化したものが図4の右である。

(3) (1) と (2) と同様、札幌市内で観測された交通流データを用いて、BPR 関数への適用を見越した確率的なリンク交通容量および BPR 関数のパラメータを推定した。図5は異なる堆雪幅におけるリンク交通容量の密度分布を表している。堆雪幅が大きくなると、リンク交通容量の平均と分散はともに減少している。これは堆雪幅の増加によって、流速が低下するためである。図6は推定されたリンク交通容量の平均(赤線)と95%信頼区間(青線)に対応するBPR関数をそれぞれ表している。緑線は推定された  $q-v$  曲線から計算された流率と移動時間の関係を表す。

(4) 図7は北海道旭川市において観測されたプローブデータの例である。1時間に各リンクを通過したプローブ車の台数を記録したものであるが、1台も観測されていないリンクが複数確認される(青でハッチ掛けされた箇所)。このように、観測データの欠測箇所が多数存在するような交通観測データの利用を前提とした、道路ネットワークレベルの交通状態推定モデルを開発した。上で述べた通り、開発したモデルは均衡制約付きの最尤推定問題として定式化される。最尤推定問題の制約となる均衡配分モデルでは交通需要と各種交通量およびリンク移動時間が確率変数として表される。確率的な交通流と移動時間の関係は図8の通りである。本研究で提案するモデルでは時間帯別の交通状態を推定する。したがって、複数の時間帯において交通需要および各種交通量、各種移動時間が定義される。

図9はテストネットワークにおいて、複数時間帯にわたり交通状態(リンク移動時間)を推定した結果である。箱ひげ図は観測されたリンク移動時間のデータを表しており、赤い点は推定されたリンク移動時間の平均を表している。

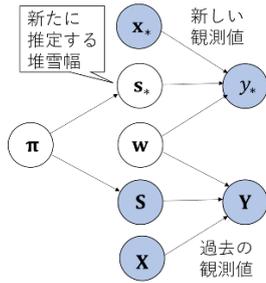
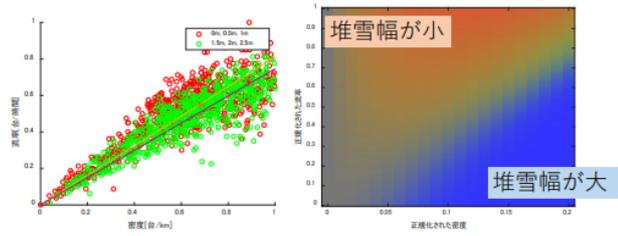


図3 提案手法のグラフィカルモデル



自由流領域のみプロット 堆雪幅の分類確率を可視化

図4 自由流領域における流率と密度(左)と堆雪幅の分類確率(右)

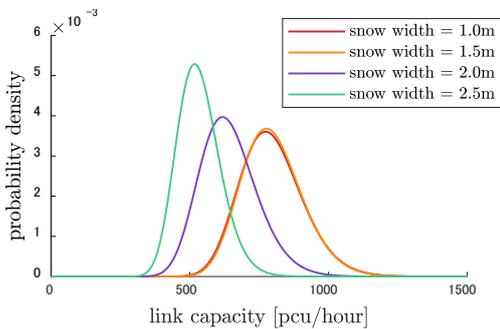


図5 推定されたリンク交通容量の密度分布

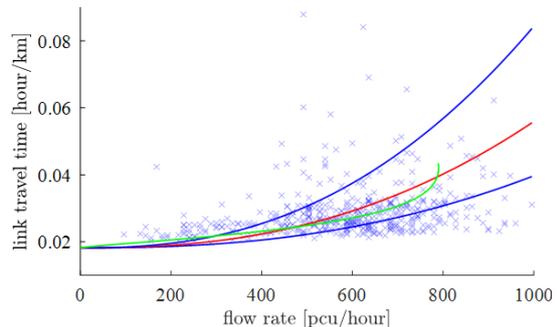


図6 推定されたBPR関数

LinkNo	2021/10/01	2021/10/02	2021/10/03	2021/10/04	2021/10/05	2021/10/06	20
106	42	37	44	46	41	52	
107	217	338	253	0	263	241	
108	83	93	118	129	124	109	
109	257	281	259	276	227	196	
110	160	195	164	148	190	124	
111	267	305	217	277	261	276	
112	169	151	167	175	149	158	
113	0	0	0	0	0	0	0
114	0	225	0	249	234	240	
115	134	172	0	132	121	162	
116	303	128	145	134	118	126	
117	180	156	156	167	162	220	
118	46	56	0	376	66	61	
119	322	324	300	366	329	369	
120	502	502	489	544	644	650	
121	123	76	74	137	207	162	
122	426	311	243	396	396	388	
123	264	201	173	187	162	222	
124	0	612	622	0	492	487	
125	894	662	998	995	612	700	
126	251	206	197	252	260	217	
127	89	0	0	0	0	0	
128	0	0	0	0	0	0	
129	245	0	0	0	0	40	
130	429	475	463	512	426	505	
131	650	124	102	110	115	141	
132	531	681	582	564	576	523	
133	0	60	0	0	81	123	
134	0	0	0	0	0	0	
135	133	138	109	143	108	222	
136	0	0	39	0	0	0	
137	0	0	35	0	0	0	
138	961	796	0	700	0	737	
139	179	220	0	0	246	247	
140	0	0	0	0	0	0	
141	168	144	78	255	159	198	
142	101	102	80	118	80	97	
143	159	137	174	171	151	164	
144	252	219	322	299	234	300	
145	94	63	60	72	60	78	

図7 プローブデータの欠測例

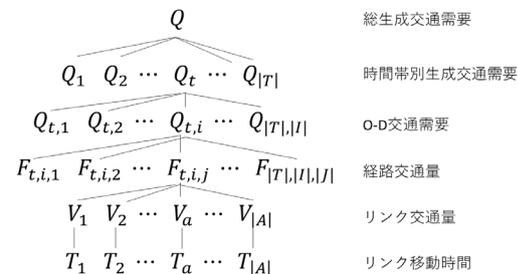


図8 各種交通需要/交通量とリンク移動時間の関係

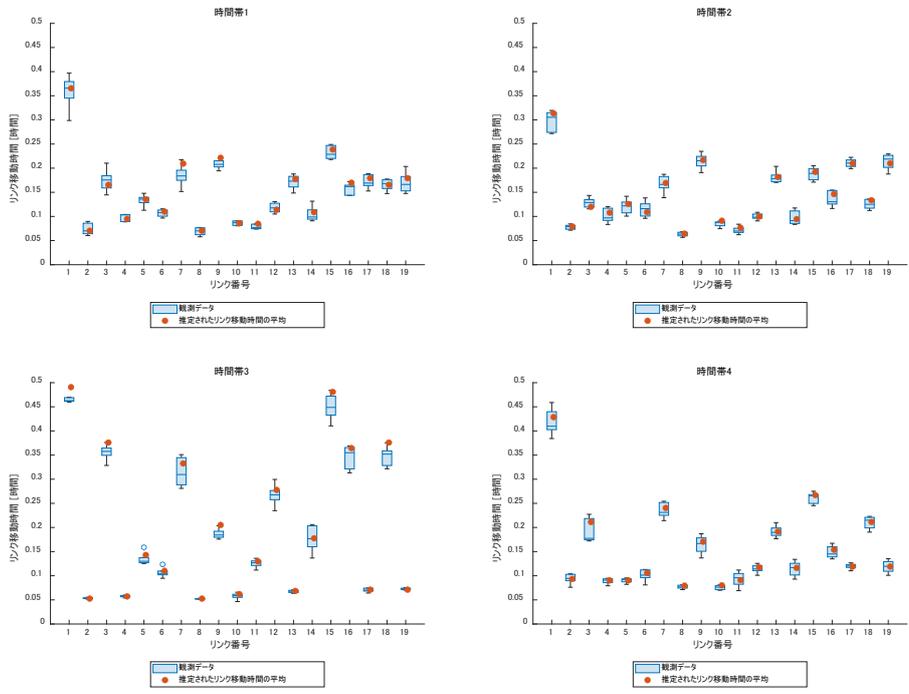


図9 複数の時間帯における観測リンク移動時間の分布と推定されたリンク移動時間の平均

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kato Teppei, Uchida Kenetsu, Tani Ryuichi, Munehiro Kazunori	4. 巻 未定
2. 論文標題 Estimation of stochastic link capacity and link performance function including uncertainty of driver's behaviour	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Transportmetrica A: Transport Science	6. 最初と最後の頁 未定
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/23249935.2023.2218943	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Ryuichi Tani, Kenetsu Uchida, Anthony Chen
2. 発表標題 Network-level traffic state estimation method for multiple time periods considering the missing traffic data
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Transport Network Resilience（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Duan Kaifeng, Ryuichi Tani, Kenetsu Uchida, Keita Zushi, Osamu Nagaoka
2. 発表標題 A Method for Estimation of Traffic States Considering Floating Car Data in a Large Network
3. 学会等名 The 15th International Conference of the Eastern Asia Society for Transportation Studies 2023（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Duan Kaifeng, Ryuichi Tani, Kenetsu Uchida, Keita Zushi, Osamu Nagaoka
2. 発表標題 A Method for Estimation of Traffic States Considering Floating Car Data in a Large Network
3. 学会等名 第67回土木計画学研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Duan Kaifeng, Ryuichi Tani, Kenetsu Uchida, Keita Zushi, Osamu Nagaoka
2. 発表標題 An Efficient Estimation Method for Traffic States Using Incomplete Floating Car Data in a Large Network
3. 学会等名 令和5年度土木学会全国大会 第78回年次学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 峪龍一, 加藤哲平, 内田賢悦, 宗廣一徳
2. 発表標題 ベイズ推論に基づく堆雪幅の確率的な予測
3. 学会等名 第65回土木計画学研究発表会・春大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤哲平, 峪龍一, 内田賢悦, 宗廣一徳
2. 発表標題 降雪時の路面状況を考慮したマクロ交通流モデルと交通容量の推定に関する研究
3. 学会等名 第66回土木計画学研究発表会・秋大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川村雄斗, 峪龍一, 内田賢悦
2. 発表標題 大規模道路ネットワークでの複数時間帯の交通状態推定の演算効率化
3. 学会等名 第66回土木計画学研究発表会・秋大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 峪龍一
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第64回土木計画学研究発表会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------