

網羅的交通シミュレーションに基づく 都市道路における堆雪状況推定手法

谷村 亮介¹ 廣森 聡仁¹ 梅津 高朗² 山口 弘純¹ 東野 輝夫¹

概要：冬季に多量の降積雪を観測する都市道路網においては、積雪量や気温の変化によって路面状態が日々変動し、旅行時間が増大する。さらに、除雪によって路肩に積み上げられた堆雪の影響により、部分的な車線減少が長時間発生する。このような状況下において、積雪が道路環境に与える複雑な影響を定量的に把握し、交通流の観測から道路状態の変化を推定することによる除排雪作業の効率化が期待されている。本研究では、片側1車線道路、片側2車線道路、信号付き交差点において、路肩に堆雪がある際の交通流を交通シミュレーターでモデル化し、交通量、堆雪の距離と位置、路面状態を変化させて旅行時間を観測することで、雪道特有の道路状況が交通流に与える影響を考察する。また、堆雪の有無や路面状態の変化により、道路を通過する車両の旅行時間分布が異なることに着目し、一致度の高い分布を網羅的シミュレーション結果から探索することにより、旅行時間の観測から堆雪状況などを推定する手法を提案する。実証実験においては、2時間分の旅行時間分布を交通シミュレーションにより生成し、その分布に提案手法を適用した。その一例として、交通量が1000veh/h程度の信号付き交差点において、交通量を7.5%の誤差、堆雪の位置を81%の正解率、路面状態を65%の正解率で推定可能なことを示した。

キーワード：雪道、都市交通、旅行時間、交通容量、プローブカーデータ、Vissim

1. はじめに

冬季に多量の降積雪を観測する豪雪都市においては、日々の降積雪が交通流に大きな影響を及ぼしている。路面上に堆積した雪により、自動車が走行しにくくなるだけでなく、道路脇に積み上げられた雪が道路の幅員を狭めることにより、道路が許容できる交通容量が大きく低下する。世界有数の豪雪都市である札幌市では冬季の積雪量がしばしば600cm程度に達し、多量の降雪があった際には普段の3倍以上の旅行時間を要する区間も存在するなど、雪が交通に及ぼす影響は多大である。気象状況と旅行時間の関係性を把握し、旅行時間を予測することは適切な除排雪計画の策定や、道路の利用者への交通情報提供などの観点から非常に重要である。筆者らの研究チームは、札幌市の日々の交通データと気象データの解析に基づき、積雪量の増加や気温の低下が旅行時間の増大を引き起こすことを明らかにし[1]、また、気象データを入力としてリンク旅行時間を日ごとに予測する手法も提案している。上記の研究では気象



図1: 路肩に積み上げられた雪の例 (2015年1月 札幌市)

状況の日々の変化が路面状態に与える影響を明らかにしたが、札幌市においては図1のように、除雪作業によって路肩に積み上げられた雪(スポット堆雪)によって、道路の幅員が減少する問題も頻発している。文献[2]では、路肩の堆雪による幅員減少により自動車の車線はみ出しが発生し、その道路の交通容量の低下と旅行時間の増加が起こることが示されている。また、幅員が著しく減少する前の適切な除排雪の実施が、渋滞の発生による経済的損失を減らす上で重要であることが述べられている。したがって、各

¹ 大阪大学 大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University, Suita, Osaka, Japan

² 滋賀大学 経済学部
Faculty of Economics, Shiga University

所で発生するスポット堆雪の存在を適切に把握することで、豪雪都市における交通環境を改善することが期待される。

近年、都市交通流を広域かつ継続的に把握するためのビッグデータとして、プローブカーデータ (PCD) が注目されている。プローブカーとは、自車両の位置や速度を定期的にサーバーへ送信する車両であり、道路上を走行する複数台のプローブカーの情報を統合することで、広範囲に渡る道路網の旅行時間などを継続的に把握できる。しかし、現在広く活用されている位置情報ベースの PCD から、各車両の加減速や走行レーンの情報など詳細な挙動を取得することはできない。そのため、スポット堆雪のような路上の障害物の存在による車両挙動の変化を、PCD のみを用いて把握することは難しい。そこで、複数プローブカーの旅行時間の集計結果から、各旅行時間の通過確率を示す「旅行時間分布」が得られることに着目する。スポット堆雪などの影響により、車線変更や一時停止をする車両の割合が変化するため、旅行時間分布からその道路の状況にある程度推定することが可能となる。

本研究では複数プローブカーの旅行時間の観測から得られる旅行時間分布を交通流の特徴量とし、その分布と一致度の高い分布を出力するシミュレーション結果を探索することで、スポット堆雪の存在や路面状態を推定する手法を提案する。まず、雪道で想定される状況を交通シミュレーター Vissim [3] 上で網羅的に再現することで、雪道特有の道路状況が旅行時間に与える影響を定量的に把握する。スポット堆雪を避けて通行する車両の挙動としては、対向車線にはみだす場合、追い越し車線に車線変更する場合、退避した後信号待ちを行う場合が代表例として挙げられる。そこで、シミュレーションを行う道路構造としては、(a) 片側 1 車線道路、(b) 片側 2 車線道路、(c) 信号付き交差点を想定する。また、雪道の交通量に影響を与える「雪道パラメータ」として、交通量 (1 時間あたり車両通過台数)、スポット堆雪の位置と距離、路面状態を与え、雪道で発生する交通状況を網羅的に再現する。雪道パラメータをそれぞれ変化させながら通過車両の旅行時間を計測し、各パラメータが交通流に及ぼす影響について考察する。さらに、各車両の通過時間の集合にカーネル密度推定を適用することで旅行時間の確率密度関数を算出し、各シミュレーション環境における旅行時間分布を収集する。同様に、テスト用シミュレーション環境において旅行時間分布を計測し、先に作成した各旅行時間分布との一致度を計算する。最も一致度の高いシミュレーション環境を探索することで、テスト環境で各車両の旅行時間だけが得られた場合でも、雪道パラメータを推定することができる。

実証実験においては、各道路構造と雪道パラメータに対して 11 回のシミュレーションを実行し、パラメータが平均旅行時間に与える影響について考察を行なう。また、そのうちの 1 回分の観測結果から旅行時間分布を取得し、残

りの 10 回分の旅行時間分布との一致度を算出することで、提案手法による雪道パラメータ推定を実施する。その結果、旅行時間の分布から雪道パラメータを推定可能なことを示す。

2. 関連研究

2.1 雪道における自動車交通特性の分析

雪道特有の自動車交通特性に関して、実施調査に基づいた研究が数多く行われている。例えば、寺内ら [4,5] は、福井県内の国道を対象とし、雪道の走行計測を行い、無雪時と降積雪時における速度の違いについて分析した結果、道路の車線数の違いや消融雪装置の有無により、交通流が変化することを明らかにしている。また、榎谷ら [6] は、峠部の道路を対象とし、路面状態や道路形状などを説明変数とし、降積雪時における走行速度に及ぼす要因を数量化理論 I 類により分析している。同様の解析手法として、堀井ら [7,8] は、豪雪都市の一般道路において走行実測を行い、そのデータを基に、混雑度、沿道状況、路面状態等を説明変数とした重回帰分析を行うことで、雪道における旅行速度を予測するモデルを作成している。また、都市交通流のボトルネック要因となる信号交差点に着目した Rui ら [9] は、信号制御パラメータや右左折の交通流を解析することで、降雪時における交差点の通過時間遅延モデルを提案している。しかしながら、これらの研究は実地走行や定点観測によって自動車の速度を取得しているため、対象となる路線に限られており、都市道路網の交通状況を広域に把握できるわけではない。

2.2 豪雪都市におけるプローブカーデータの利活用

近年では、プローブカーシステムの普及に伴い、PCD を活用して豪雪都市における広域の交通流の特性を把握する研究も盛んである。宗広ら [10,11] は、115 台分のタクシー PCD から雪道の交通速度を分析し、札幌市の冬期交通特性の分析結果例を紹介すると共に、タクシー PCD の利活用方法について考察している。同調査の結果、降雪時や圧雪路面の発生により平均旅行速度が著しく低下することなど、路面状態と旅行速度との関係性が示されている。Munehiro ら [12] は、タクシー PCD から得た平均速度情報と除排雪の実施状況を分析し、除排雪による平均速度の改善効果を定量的に把握するとともに、除排雪の実施を最適化する手法について論じている。赤平ら [2] は、バス PCD の調査に基づき、路肩の堆雪による幅員減少が旅行時間の低下を引き起こすことを示している。渋滞の発生に伴う経済的損失額についても試算しており、車道部堆雪幅が 2.0m を越える前に除雪を行うことが重要であるとしている。

2.3 ミクロ交通シミュレーターによる雪道のモデル化

豪雪都市の積雪状況はその年の気候変動によっても変化

するため、実地調査に基づくデータ収集により様々なパターンの交通状況を網羅的に把握することは難しい。そこで、Vissim に代表されるミクロ交通シミュレーターを活用して、雪道特有の交通状況や運転挙動を把握する先行研究が存在する。Asamer ら [13] は、実際の雪道で収集した交通容量に基づき、Vissim で用いられる車両追従モデルのパラメータをキャリブレーションすることで、雪道の運転挙動をシミュレーター上で再現する手法を提案している。また、Ming ら [14] は、路面の摩擦係数の低下によって車両の平均停止距離が増大することに着目し、積雪、凍結路面における交通容量の低下量を算出した。この結果に基づき、Vissim の運転挙動パラメータを変更して幹線道路における交通容量の測定実験を行い、路面が雪や氷に覆われている場合は平常時と比べて交通容量が 29.85% ~ 41.63% に低下する事を明らかにした。これに伴い旅行時間が大幅に増大するため、雪道においては交通容量の低下を十分に考慮することが重要であると結論づけている。

本研究では、路面状態の変化だけでなくスポット堆雪の存在による車線数の減少も考慮することで、豪雪都市特有の交通状況をより詳細に把握する。さらに PCD から旅行時間分布が得られる環境を想定し、網羅的シミュレーションで得られた結果とマッチングすることで、スポット堆雪や路面状態を推定する手法も提案する。これにより、PCD を用いて雪道の状況に関する様々な情報を推定する。

3. 交通シミュレーターによる雪道のモデル化

本研究では、スポット堆雪が交通流に与える影響を明らかにするため、ミクロ交通シミュレータ Vissim を用いて交通量、スポット堆雪の有無、路面状態の 3 つの雪道パラメータが変化する豪雪都市の道路状況を再現し、旅行時間の測定を行う。本章では、シミュレーションを実行するための雪道のモデル化手法について述べる。

3.1 道路ネットワークの設計とスポット堆雪の設置

路肩にスポット堆雪のような障害物が存在するときの自動車の挙動は、道路の車線数や信号機の有無によって異なる。本研究では、対向車線にはみ出して走行する場合、追い越し車線に車線変更する場合、障害物の先に交差点が存在する場合の 3 パターンを代表例とし、(a) 片側 1 車線道路、(b) 片側 2 車線道路、(c) 信号付き交差点の 3 つの道路構造をモデル化した。図 2 にそれぞれの道路の模式図を示す。

(a) 片側 1 車線道路 (図 2a) においては、スポット堆雪を避ける車両は対向車線にはみ出して走行する。この挙動を再現するために、スポット堆雪を避ける車両 (上り車両) の進路を図 2a のように指定した上で、「衝突エリア」を設定する。もし対向車がこの中に存在している場合、これから侵入する車両は一時停止して対向車の通過を待つ。これ

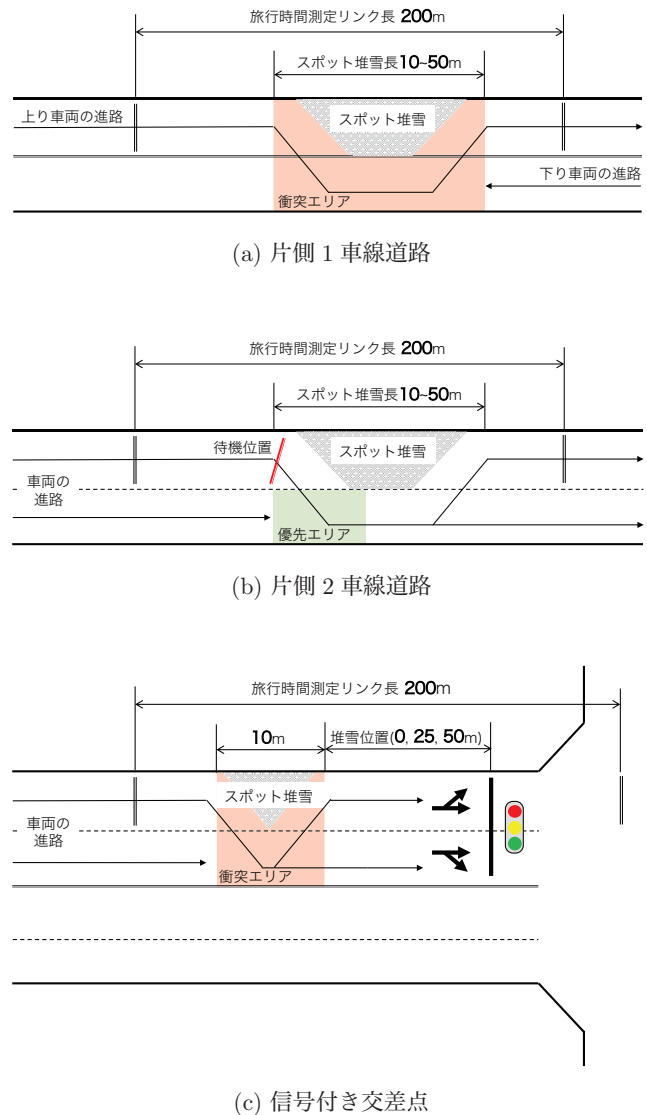


図 2: シミュレーションを実行する道路構造

により、上下方向の車両が互いに譲り合って走行する挙動を再現する。なお、スムーズな車線変更を行うため、衝突エリアの距離は最低でも 10m としている。スポット堆雪長は 10m~50m の範囲で変化することを想定する。

(b) 片側 2 車線道路 (図 2b) では、左車線を走行する車両は、追い越し車線へと車線変更することでスポット堆雪を避ける。よって、車線の減少に伴う合流と同様の挙動で通過するとみなすことができる。そこで、スポット堆雪の箇所に「優先エリア」を設けることでこの挙動を再現した。左側の車線を走行する車両は、優先エリアに車両が存在する場合は「待機位置」で一時停止して車両の通過を待つ。これにより、追い越し車線を走行する車両に衝突せずに車線変更を行う。

(c) 信号付き交差点 (図 2c) では、信号機の停止線の手前にスポット堆雪が存在する状況を想定する。このような環境においては、スポット堆雪の位置によって信号待ち車列が変化する。よって、スポット堆雪の位置を停止線から

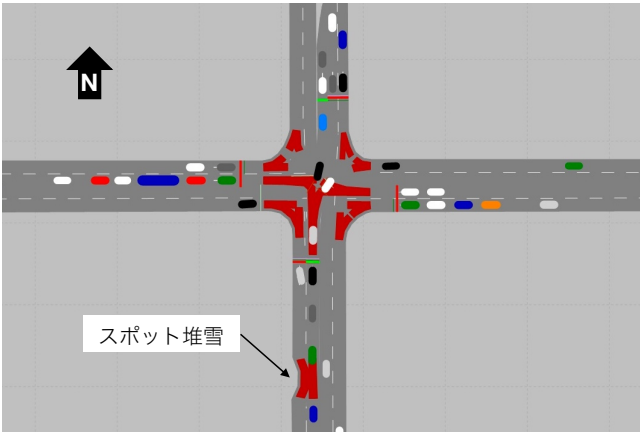


図 3: 信号付き交差点のシミュレーション環境

0m (停止線上), 25m, 50m と変化させ、シミュレーションを実施した。スポット堆雪の距離は 10m で固定し、(a)と同様に衝突エリアを設定した。なお、交差点に侵入する車両の挙動は、交差点の形状や信号周期、右左折車両の割合などに影響を受ける。そこで、交差点の形状は札幌市の片側 2 車線交差点「北 23 西 5 (西 5 丁目樽川通)」の形状を航空写真からトレースした。また、富士通の「タクシープローブ交通情報サービス [15]」の車両通過情報に基づき、南から北方向の交通量に対する各方面の交通量の比と、右左折車両の割合を推定した。なお、信号周期については任意の値を設定可能とした。参考として、実際のシミュレーション環境を図 3 に示す。スポット堆雪の位置の衝突エリアは赤色で示されており、この箇所を通行する車両は譲り合って走行する。また、交差点内においては右左折車両の通過箇所衝突エリアが設けてあり、右左折待ち車両と直進車両が重なって走行することを防いでいる。

3.2 積雪道路の路面状態の設定

雪道においては、スポット堆雪だけでなく、路面の状態によっても車両の挙動が変化する。Vissim では、運転挙動モデルのパラメータを変化させることで、路面状態の変化を再現可能である。雪道における運転挙動パラメータの設定方法としては、大量に収集した実データに適合する値を探索する手法 [13] など提案されているが、本研究では Ming [14] らの用いたパラメータを採用した。Ming らは、路面の摩擦係数の変化に伴う制動距離の増大に着目し、雪道と凍結路面の運転挙動パラメータを導いた。このパラメータの値を表 1 に示す。表 1 のパラメータは、路面状態が悪くなるほど前後間隔に余裕をもたせ、加減速度が鈍くなる運転挙動となる。例えば、平均停止距離の増加に伴い、信号待ちなどの際の車間距離が増大する。また、最大減速度の低下により、車線変更の際の速度変化が緩やかになる。

以上のように、それぞれの道路構造に対し、「交通量」、「スポット雪の距離または位置」、「運転挙動」の 3 つの雪

表 1: 路面状態別の運転挙動パラメータ (文献 [14] より引用)

運転挙動			通常	雪道	凍結
運転モデル (Wiedemann74)	平均停止距離 (m)		2	5	5
	前方視認距離 (m)		250	150	50
車線変更挙動 (自由車線変更)	最大減速度 (m/s ²)	自車両	-4.0	-1.5	-1.0
		前方車両	-3.0	-1.5	-1.0
	前方間隔 (m)		0.5	1.5	3.5
最小交錯距離	V = 0 km/h(m)		0.5	0.5	1.0
	V = 50 km/h(m)		0.5	1.5	1.5

表 2: シミュレーションの実行環境

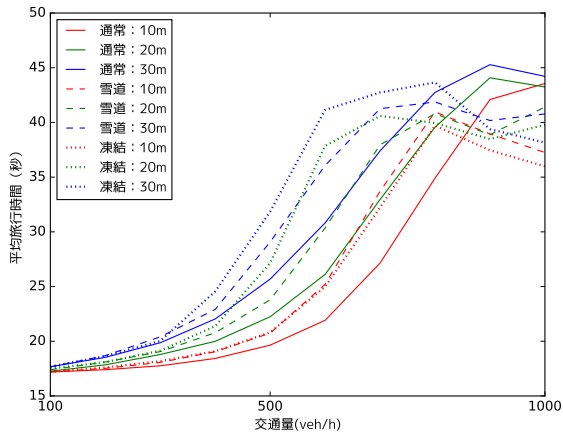
	片側 1 車線	片側 2 車線	信号付き交差点
実行時間 (秒)	7800 (2 時間 10 分)		
計測期間 (秒)	600 ~ 7800 (2 時間)		
交通量 (veh/h)	100 ~ 1000	100 ~ 2000	100 ~ 2000
堆雪距離 (m)	※各 100veh/h 刻みとする		
	10 ~ 50	10 ~ 50	10
堆雪位置 (m)	※各 5m 刻みとする		
	-	-	0, 25, 50, なし
運転挙動	通常	雪道	凍結

道パラメータを変化させて網羅的なシミュレーションを行い、各要素が旅行時間に与える影響を把握する。

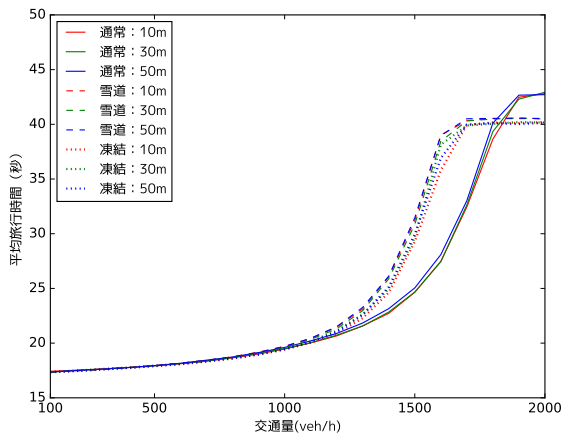
4. 雪道シミュレーションの実行結果と考察

本章では、Vissim を用いた雪道シミュレーションの結果を示すとともに、各パラメータが旅行時間に与える影響について考察する。まず、シミュレーションの実行環境を表 2 に示す。各シミュレーションは 2 時間 10 分実行し、10 分後に旅行時間の計測を開始する。交通量については 100veh/h 刻みで、表で示した範囲内で変化させた。(c) 信号付き交差点の信号周期は 90 秒サイクルとし、青時間は南北 : 東西 = 2 : 1 とした。参考とした交差点では南北方向に右折用信号が設置されているため、10 秒の右折専用時間を設けた。また、観測ごとのばらつきを考慮し、それぞれのパラメータにつき、異なるランダムシードで合計 11 回のシミュレーションを行った。

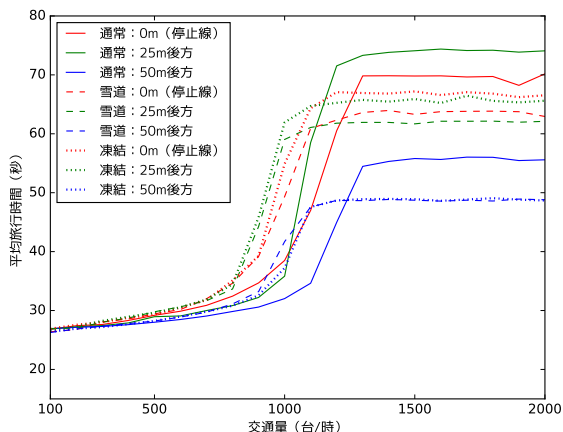
シミュレーション結果として、路面状態とスポット堆雪のパラメータの組み合わせを 9 つ抜粋し、交通量ごとの平均旅行時間の変化を図 4 に示す。それぞれの道路構造において、交通量の増大に伴う旅行時間の増加が観測された。(a) 片側 1 車線道路 (図 4a) においては交通量と路面状態が同じ場合でも、スポット堆雪が 10m から 30m に増大するにつれ旅行時間が悪化した。これは衝突エリアの増大に伴い、対向する車両の通過を待つ時間が長くなるためであると考えられる。また、路面状態の悪化によっても旅行時間が増大することが確認された。「通常:10m」から「雪道:10m」の旅行時間増大量よりも「通常:30m」から「雪



(a) 片側 1 車線道路
(上りの交通量=下りの交通量の場合)



(b) 片側 2 車線道路



(c) 信号付き交差点 (直進車両)

図 4: 交通量ごとの平均旅行時間 (一部抜粋)

道:30m」の増大量が大きいことから、スポット堆雪が長く車両の停止機会が多い場合、路面状態の悪化の影響が顕著になると考えられる。

それに対し (b) 片側 2 車線道路 (図 4b) では、スポット

堆雪の距離による旅行時間の変化は観測されなかった。この環境では全ての車両が同じ方向に進行するため、車線減少地点のみがボトルネックとなり、スポット堆雪の長さは旅行時間に影響を与えない。しかし、前方で渋滞が発生している場合などは、スポット堆雪の距離が車両の挙動に影響を与える可能性があり、今後の検証が必要である。

(c) 信号付き交差点 (図 4c) では、「通常:50m」の場合に対して、「通常:25m」の場合は旅行時間が増大した。スポット堆雪が停止線近くに位置する場合、雪を通過した後に 2 車線分を使って信号待ちする車列長が短くなる、交通流が悪化すると考えられる。なお、交通量が 1500veh/h 程度になると通過可能な車両数が飽和するため、200m の計測区間での旅行時間は一定となる。また、雪道や凍結路面では停車時の車間距離が長くなるため交通密度が低下し、結果として平均旅行時間は短くなるが、通過できた車両数は減少した。

本章では、3 種類の道路構造について網羅的シミュレーションを実施し、各パラメータが旅行時間に与える影響について調査した。この結果から、スポット雪の長さや位置による交通流への影響の違いや、異なる道路構造における各パラメータの影響度の違いを把握することができた。

5. 旅行時間分布マッチングによる雪道パラメータの推定

本章では、PCD から旅行時間のみが得られる状況を想定し、これをシミュレーション結果とマッチングすることで、雪道パラメータを推定する手法を説明する。図 5 は (c) 信号付き交差点でのシミュレーションにおいて、平均旅行時間がほぼ等しい 2 つの環境の旅行時間分布をヒストグラム (ビンの幅=2 秒) で示した図である。それぞれの環境では平均旅行時間がほぼ同一であるが、信号待ちする車両の割合や加減速度が異なるため、旅行時間分布には違いが見られる。この例から、旅行時間分布を雪道パラメータの影響を表す特徴量として利用することで、平均旅行時間より多くの情報を取得可能であることがわかる。したがって提案手法では、PCD から得られる旅行時間の分布を特徴量とみなしてマッチングを行う。

5.1 旅行時間分布の推定

まず初めに、個々の車両の観測から旅行時間分布を推定する手法を述べる。交通シミュレーションにより観測した旅行時間の集合を取得し、カーネル密度推定を用いて旅行時間の分布を推定する。交通量 $V = v$ 、スポット堆雪の距離 $S = s$ 、路面状態 $R = r$ の時に観測した旅行時間の集合を $TT_{(v,s,r)} = \{t_1, \dots, t_n\}$ (n は通過車両数) と定義すると、カーネル密度関数による推定はカーネル関数 K 、バンド幅 h を用いて式 (1) で表される。

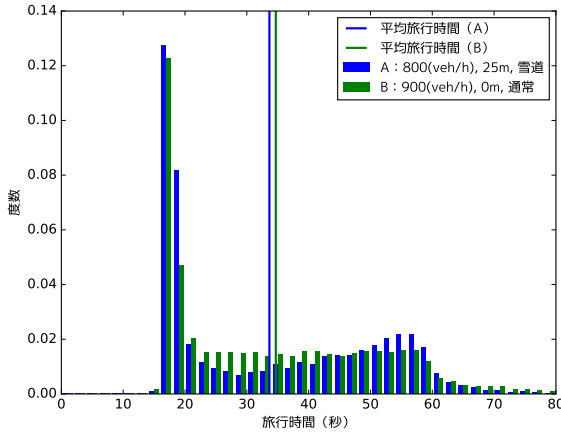


図 5: 信号付き交差点で観測された旅行時間分布

$$P_{(v,s,r)}(t) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{t-t_i}{h}\right) \quad (1)$$

ここで、カーネル関数 K は標準正規分布を採用する。また、カーネル密度推定の出力はバンド幅 h によって異なる。バンド幅 h の決定方法は様々なものが提案されているが、本研究では、Scott ら [16] が提案している式 (2) の指標を用いてバンド幅 h を決定した。

$$h = n^{-(1/(d+4))} \quad (2)$$

ここで、 d はカーネル密度推定の次元数であり、本研究においては $d = 1$ となる。

各シミュレーションの旅行時間の出力結果に対してカーネル密度推定を行うことで、旅行時間の確率密度関数 $P_{(v,s,r)}(t)$ を推定し、これを各シミュレーション結果の特徴量とみなす。

5.2 網羅的シミュレーション結果とのマッチング手法

本研究では、2つの確率密度関数同士の一致度を示す代表的な指標である、Jensen-Shannon 情報量 (JS 情報量) に基づいて2つの確率密度関数同士のマッチングを行う。2つの確率密度関数 $P(t), Q(t)$ が与えられたとき、JS 情報量は Kullback-Leibler 情報量 [17](KL 情報量) を用いて式 (4) で算出される。

$$D_{KL}(P||Q) = \int_{-\infty}^{\infty} P(i) \log \frac{P(i)}{Q(i)} \quad (3)$$

$$D_{JS}(P||Q) = \frac{1}{2}(D_{KL}(P||M) + D_{KL}(Q||M)) \quad (4)$$

$$\text{ただし } M = \frac{1}{2}(P + Q)$$

JS 情報量は $P(t_i) = 0$ の場合でも有限となる扱いやすい性質を持つため、本研究では JS 情報量を一致度の指標として採用した。JS 情報量は2つの確率密度関数同士の違いを表す指標であり、関数同士が近いほど0に近づく。

JS 情報量が最も小さくなる確率密度関数を探索すれば、

尤もらしいパラメータを推定可能である。しかし、得られた旅行時間の集合データの量や、車両の到着タイミングのばらつきによっては、正確な確率密度関数が得られない場合がある。このような場合、パラメータの組 (V, S, R) が正解と極端に異なるシミュレーション結果との一致度が偶然高くなるなど、正しい推定結果が得られない場合がある。そこで、マッチングの精度をより高めるために2つの手法を提案する。

まず、交通量については道路の種別などからある程度の見当がついていると仮定し、±数百 veh/h 範囲のシミュレーション結果に対してマッチングを行う。本研究では、真値から ±300veh/h の範囲で絞り込みを行う。次に、周辺環境との一致度の評価を行う。パラメータを調査したい確率密度関数 P_{test} が得られたとき、あるシミュレーションで得られた確率密度関数 $P_{(v,s,r)}$ との一致度 $JS(v, s, r)$ を式 (5) から算出する。

$$\begin{aligned} JS(v, s, r) = & D_{JS}(P_{test}||P_{(v,s,r)}) \\ & + \frac{1}{w} \{ D_{JS}(P_{test}||P_{(v+100,s,r)}) \\ & + D_{JS}(P_{test}||P_{(v-100,s,r)}) \\ & + D_{JS}(P_{test}||P_{(v,s+10,r)}) \\ & + D_{JS}(P_{test}||P_{(v,s-10,r)}) \} \end{aligned} \quad (5)$$

このように、 $P_{(v,s,r)}$ だけの一致度だけでなく、雪道パラメータ (V, S, R) を一部変化させたシミュレーション結果との一致度も算出し、ペナルティ項として加えることで、パラメータ (V, S, R) が極端に異なる確率密度関数との一致度が偶然高くなってしまふことを防ぐ。ここで、 w は周辺一致度の重みであり、本研究では $w = \frac{1}{4}$ を設定した。全ての V, S, R の組み合わせについて一致度を算出し、 $JS(V, S, R)$ が最小となる場合のパラメータの組を P_{test} の推定値とする。

以上の手法により、PCD から旅行時間の観測のみが得られた場合でも、その道路状況を示す雪道パラメータ (V, S, R) の組を推定することができる。

6. 雪道パラメータの推定手法の精度評価

6.1 評価方法

実際の PCD の観測とその時の雪道状況の真値を十分多く収集することは困難であるため、本研究では Vissim によるシミュレーション結果の一部を PCD の観測とみなし、テストデータとして利用する。試行回数を増やすため、精度の評価は Leave-One-Out 交差検証によって行なった。雪道パラメータの組合わせを変えながら合計 11 回行った網羅的シミュレーション結果の内、その内の 1 回分をテストデータ、残りの 10 回分をマッチング対象として利用し、全結果が 1 回ずつテスト事例となるよう検証を繰り返した。(a) 片側 1 車線道路については、上りと下りの交通量の全

通り (10×10 通り) のシミュレーションを行なったが、実際の交通環境では上下方向の交通量に大きな差異は無いと想定されるため、上下の交通量の差が 300veh/h 以下のテストケースに限定して精度評価を行なっている。

精度はテストデータの交通量ごとに算出した。交通量とスポット堆雪の距離の推定精度は Mean Absolute Percentage Error(MAPE), スポット堆雪の位置と路面状態の推定精度は正解率で示す。MAPE は以下の式 (6) で表され、推定値 F_t と真値 A_t の乖離率を示す。

$$MAPE(\%) = \frac{100}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| \quad (6)$$

6.2 評価結果

道路構造ごとの推定精度の評価結果を図 6 に示す。パラメータの推定精度は道路構造ごとに異なっており、これは各構造ごとの車両の通行挙動の違いを反映していると考えられる。

(a) 片側 1 車線道路 (図 6a) では、交通量の増加に伴い交通量の MAPE は減少した一方で、スポット堆雪距離の MAPE は増加した。交通量が増加するとスポット堆雪部分で対向車が現れる頻度が高くなるため、平均的な旅行時間が増加する。一方、対向車の通過を待機する時間の影響が薄れるため、スポット堆雪距離の推定精度は悪化する。路面状態の正解率は概ね 60% 程度であった。

(b) 片側 2 車線道路 (図 6b) では、交通量の MAPE が概ね 20% 以下であり、高い推定精度を達成した。図 4b に示したように、片側 2 車線道路では交通量の変化に伴って平均旅行時間が増大するため、交通量の推定は容易である。一方、スポット堆雪距離の違いが運転挙動に与える影響が少ない道路構造であるため、スポット堆雪距離の推定精度は低い。路面状態の正解率は全ての交通量の場合で 40% を超えており、3 つの状況がある程度区別できている。交通量が 1500veh/h 以上の場合にはスポット堆雪部分で停車する車両が多くなるため、路面状態ごとの違いが顕著に現れ、正解率が向上している。

(c) 信号付き交差点 (図 6c) では、交通量が 700veh/h 以下の場合の各パラメータの推定精度が低い。この道路構造においては、各車両の旅行時間は信号への侵入タイミングによって大きく異なるため、交通量が少ない場合は正確な旅行時間分布を測定することが困難であり、マッチングの正解率が下がる。しかし、本研究では都市部における交通状況を想定しているため、このような信号付き交差点における交通量はある程度多くなると考えられる。交通量が 800veh/h 以上の場合には、各パラメータの推定精度は高く、交通状況を十分に推定できている。例として、交通量が 1000veh/h の時のスポット堆雪の位置と路面状態の正解率を、それぞれ表 3 と表 4 に示す。表 3 では、スポット堆雪位置の正解率がそれぞれ 70% 以上であることが示されてお

表 3: (c) 信号付き交差点のスポット堆雪位置正解率

交通量 1000veh/h	推定 (%)			
	0m	25m	50m	なし
正解	73.3	0	0	26.7
	0	86.7	10.0	3.3
	0	0	70.0	30.0
	0	0	3.3	96.7

表 4: (c) 信号付き交差点の路面状態正解率

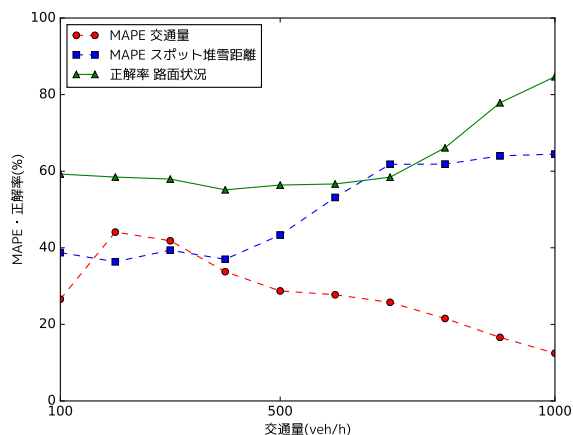
交通量 1000veh/h	推定 (%)		
	通常	積雪	凍結
通常	80.0	15.0	5.0
正解 積雪	25.0	60.0	15.0
凍結	27.5	17.5	55.0

り、スポット堆雪の有無や位置を高い精度で推定できている。また、表 4 においては、積雪路面と凍結路面の正解率がそれぞれ 60%, 55% であり、路面の悪化状況もある程度区別できている。さらに、図 6c より、交通量の MAPE は 7.5% であり、この環境下においては 3 つの雪道パラメータを高精度に推定可能であることがわかる。

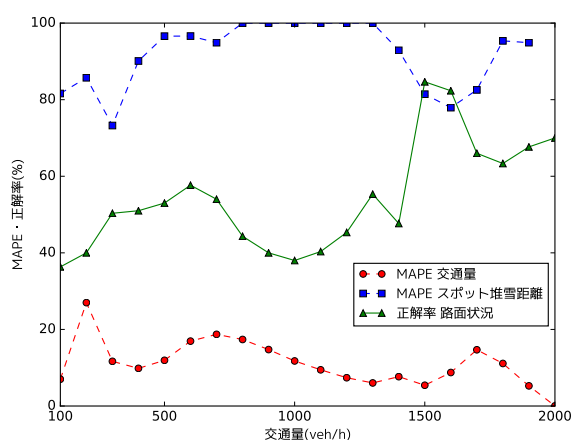
7. おわりに

本研究では、冬季道路における交通状況の変化を把握することを目的として、(a) 片側 1 車線道路、(b) 片側 2 車線道路、(c) 信号付き交差点の 3 つの道路構造に対して、スポット堆雪の存在や路面状態の変化を想定した網羅的な交通シミュレーションを実施した。さらに、シミュレーション環境ごとの旅行時間分布関数を算出し、テスト環境で得た関数とマッチングを行うことで、旅行時間の観測のみから交通量、スポット堆雪の距離と位置、路面状態の 3 つの雪道パラメータを推定する手法を提案した。今後の課題としては、PCD の旅行時間データとスポット堆雪の実地観測に基づいた、実環境上での提案手法の適用が挙げられる。本研究では、あらゆる環境を想定した網羅的なシミュレーションを実施したが、より実環境に即したシミュレーションを行い、旅行時間分布を取得する必要がある。ここで得られた分布と PCD の旅行時間分布とをマッチングすることで、現実的に発生し得る雪道の状況を、より正確に把握することが可能となる。

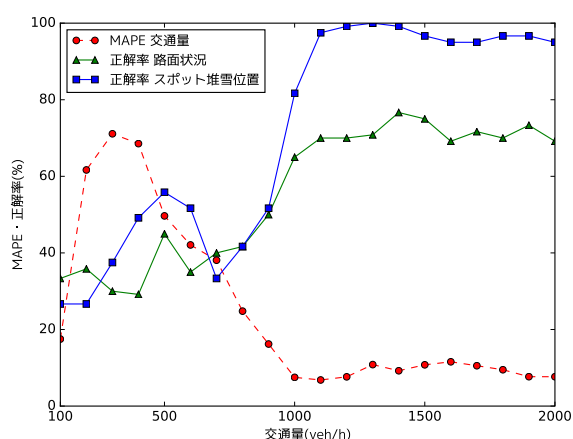
謝辞 本研究の一部は、文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業-次世代 IT 基盤構築のための研究開発 - 「社会システム・サービスの最適化のための IT 統合システムの構築」(2012 年度 ~ 2016 年度) の助成を受けたものです。また、本研究では、株式会社ネクストが国立情報学研究所の協力により研究目的で提供している「HOME' S データセット」を利用しました。



(a) 片側 1 車線道路



(b) 片側 2 車線道路



(c) 信号付き交差点

図 6: 交通量ごとの雪道パラメータ推定精度

参考文献

- [1] Ryosuke, T., Akihito, H., Hirozumi, Y., Takaaki, U. and Teruo, H.: Prediction of Deceleration Amount of Vehicle Speed in Snowy Urban Roads Using Weather Information and Traffic Data, *IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, pp. 2268–2273 (2015).
- [2] 赤平勝也, 岩瀬伸哉: 除雪幅員と走行速度に関する分析検討について, 雪氷研究大会講演要旨集, Vol. 2009, No. 0, pp. 172–172 (2009).
- [3] PTVGroup: PTV Vissim.
<http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-us/products/ptv-vissim/>.
- [4] 寺内義典, 三村泰広, 加藤哲男, 本多義明: 降積雪時における自動車交通のおくれに関する研究: 道路の消融雪装置設置箇所の選定への応用, 日本雪工学会誌: Journal of snow engineering of Japan, Vol. 20, No. 2, pp. 123–129 (2004).
- [5] 三村泰広, 寺内義典, 李泰榮, 本多義明: 積雪時の都心部交差点における左折車の走行実態, 日本雪工学会大会論文報告集, Vol. 20, pp. 53–54 (2003).
- [6] 梶谷有三, 浦田康滋, 田村亨: 北海道峠部の冬季走行速度に及ぼす影響要因について, 交通工学研究発表会論文報告集, pp. 125–128 (1998).
- [7] 堀井雅史: 積雪都市における道路交通流特性に関する統計分析, 土木計画学研究講演集, Vol. 14, No. 1, pp. 667–672 (1991).
- [8] 堀井雅史: 積雪都市における旅行速度予測指標に関する一検討, 土木計画学研究講演集, Vol. 16, No. 1, pp. 49–53 (1993).
- [9] Rui, O. and Miaochan, Z.: Study on Signal Intersection Traffic Flow Characteristics in Ice Conditions, *Journal of Networks*, Vol. 9, No. 7, pp. 1962–1969 (2014).
- [10] 宗広一徳, 高橋尚人, 浅野基樹: タクシープローブデータを活用した札幌都市圏における冬期渋滞特性の分析, 土木計画学研究・講演集, Vol. 31 (2005).
- [11] 宗広一徳, 秋元清寿, 高橋尚人, 浅野基樹, 三谷光照: 冬期道路交通評価へのタクシープローブデータの活用 札幌市における事例, 北海道開発土木研究所月報, No. 632, pp. 19–28 (2006).
- [12] Munehiro, K., Kageyama, H., Takahashi, N., Ishida, T. and Asano, M.: Approach to Optimization of Winter Road Management Operation by Taxi Probe Data, *Transportation Research Board 92nd Annual Meeting*, No. 13-0952 (2013).
- [13] Asamer, J., van Zuylen, H. J. and Heilmann, B.: Calibrating car-following parameters for snowy road conditions in the microscopic traffic simulator VISSIM, *IET Intelligent Transport Systems*, Vol. 7, No. 1, pp. 114–121 (2013).
- [14] ming He, Y. and quan Zhu, B.: Simulation and Analysis on Traffic Capacity Reduction in Ice or Snow Condition, *Proceedings of International Conference on Computational and Information Sciences*, pp. 234–237 (2010).
- [15] 富士通: タクシープローブ交通情報サービス.
<http://jp.fujitsu.com/solutions/convergence/service/spatiowl/trafficinfo.html>.
- [16] Scott, D. W.: Multivariate density estimation and visualization, *Handbook of computational statistics*, Springer, pp. 549–569 (2012).
- [17] Kullback, S. and Leibler, R. A.: On information and sufficiency, *The annals of mathematical statistics*, Vol. 22, No. 1, pp. 79–86 (1951).