

気象および交通データ解析に基づく 積雪期における交通速度低下の推定手法

谷村 亮介^{1,a)} 廣森 聡仁¹ 梅津 高朗² 山口 弘純¹ 東野 輝夫¹

概要：冬季に多量の積雪がみられる積雪都市においては、降積雪が交通流に大きな影響を及ぼしている。路面上に雪が堆積することにより、自動車が道路を走行しにくくなるだけでなく、堆積した雪が道路脇に積み上げられることで道路の幅員が狭くなるため、その道路の交通容量は大きく低下する。降積雪が道路交通に与える影響の把握は、積雪都市における交通計画管理上重要な課題である。本研究では、世界有数の積雪都市である札幌市において、プローブカーデータから得られる道路交通情報、及び降雪量や積雪量などの気象データを収集し、これらのデータを重回帰分析によって分析することで、気象条件の変化に伴う道路交通速度の変動を推定するモデル式を作成する手法を提案する。札幌市内の実道路上のプローブカーデータを用いて提案手法によるモデル構築を行った結果、重相関係数が0.844の重回帰式を作成でき、雪道の交通速度の低下は気象データによってある程度説明可能であることを示した。また、複数の路線を対象にしたモデル構築の結果から、ある路線では積雪量以外にも前日最高気温が速度低下に影響を与えていたのに対し、別の路線では前日日照時間が速度低下要因となることなどがわかった。

1. はじめに

近年、人やモノなど実世界の事象が、多様なセンサデータにより観測できる状況になり、これらから収集された多岐にわたるデータ、いわゆるビッグデータを分析評価した結果を実世界の活動に適切にフィードバックし、新たな価値を創成する技術に期待が集まっている。こういった技術はサイバーフィジカルシステム(CPS)と呼ばれており、社会システムやサービスの高効率化、省エネ等の様々な課題解決につながるものとして期待されている。

このような取組の一つとして、札幌市における除排雪の効率化及び最適化を目指す「スマート除排雪」が挙げられる。札幌市は人口約190万人の大都市であるとともに、年間平均降雪量は597cmにも及ぶ世界有数の積雪都市である。そのため、冬季には限られた時間と予算で、市内の道路に堆積した積雪を効率よく除雪及び排雪することが求められている。この取り組みでは、札幌市における様々なデータを収集し、それらを組み合わせて分析、及び評価することにより、除排雪関連の情報を市民へ発信するだけでなく、除排雪車の効率的なオペレーションの実現など、札

幌市全域を対象とした効率的な道路管理体制を確立することを目指している。例えば、各道路における積雪状況を把握するために、車両にレーザーレンジスキャナ(LRS)を搭載し、その車両が通行する道路上をスキャンすることで、道路脇に積み上げられた雪の量や道路の有効幅員を推定する方法が検討されている。一方、路面状況を直接計測するだけでなく、ソーシャルネットワーキングサービス(SNS)上に投稿された積雪情報や除排雪に対する苦情などの情報を集約することにより、各地点における積雪の状態を予測する取り組みも実施されている。このように、さまざまな情報源から得られるデータを基に、札幌市における道路の状態を詳細に把握する手法が提案されている。効率的な除排雪オペレーションを実現するためには、これらの情報を基に、道路状況の変化が車両の通行速度に与える影響を広範囲かつ定量的に評価することが求められる。降積雪が道路通行に与える影響の例として、道路脇に積み上げられた積雪により、通行可能な道路幅員が狭まり、その道路を通行できる車両の数が低下する状況が挙げられる。このような影響を把握する取り組みがいくつか行われており[1-3]、文献[1]では、一部の道路を対象に試験車の走行により、旅行速度の予測モデルを構築する取り組みが示されている。しかしながら、試験車の走行する道路や日時は限られており、日々変化する路面状態をモデルに反映することができず、都市部における降積雪の影響を必ずしも把握で

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

a) r-tanimr@ist.osaka-u.ac.jp

きているわけではない。

近年、プローブカーから得られる速度情報や位置情報などのデータを利用し、様々な時間帯において、広範囲に渡る道路交通状況を把握する研究が数多く行われている [4-6]。プローブカーとは、GPS や速度計などのセンサー及び無線通信機器を搭載し、位置情報や速度情報などの様々な情報を収集及び送信する車両である。プローブカーシステムでは、複数のプローブカーから得られた情報を組み合わせることで、個々のプローブカーが走行した広範囲の道路状況を把握することができる。プローブカーデータの特徴を活かした取り組みとして、文献 [4,5] では、中国のある都市において収集された多数のタクシープローブデータを分析することで、都市全体の交通状況をリアルタイムに把握し、タクシーの稼働状況や交通渋滞情報などをユーザーに提供するシステムを開発している。プローブカーデータを活用し、都市の交通状況を広範囲に把握する取り組みはいくつかあるが、積雪都市では、冬季の多量の降積雪が交通流に大きな影響を及ぼしているため、気象条件の変化を考慮に入れた上で交通状況を評価する必要がある。

本研究は、プローブカーデータから得られる道路交通情報、及び降雪量や積雪量などの気象データを分析することによって、気象条件の変化に伴う道路交通速度の変動を推定する手法を提案する。提案手法においては、まず各道路における1日ごとの速度情報をプローブカーデータから収集し、積雪期における各道路区間ごとの日々の平均速度変化を記録する。さらに気象観測地点で観測された降雪量や積雪量などの気象データを収集する。これらのデータを重回帰分析によって分析し、降積雪量などの気象データから道路交通速度を推定するモデル式を作成する。このモデル式を分析することにより、雪道の速度低下を気象データから推定するとともに、気象条件の変化が雪道の交通速度に与える影響について評価を行う。

提案手法の有効性を評価するために、実際に計測されたタクシープローブデータ及び気象データを基に速度推定モデルを構築し、札幌市内の実道路において、道路状況の評価を行った。その結果、ある路線に対して重相関係数0.844の重回帰式を作成でき、雪道の交通速度の低下は気象データによってある程度説明可能であることを示した。また、複数の路線に対して重回帰分析を実施した結果からモデル式のパラメータを比較することによって、ある路線では積雪量以外にも前日最高気温が速度低下に影響を与えていたのに対し、別の路線では前日日照時間が速度低下要因となる事などがわかった。さらに、それぞれの要因が速度低下に与える影響の大きさも道路によって異なることを分析した。

2. 関連研究

2.1 プローブカーデータを用いた都市部の交通状況把握

プローブカーシステムでは、道路上を走行するプローブカーの走行データを収集するため、広範囲に渡るデータをリアルタイムかつ低コストで収集することが可能となる。この特徴を活かした取り組みとしては、都市部を対象とし、広域の交通状況を把握する研究が数多く実施されている。Liu ら [4] は、中国のある都市において収集された約15,000台のタクシープローブデータを分析することにより、タクシーの稼働状況や交通渋滞情報などをユーザーに提示するシステムを開発している。文献 [5] でも同様の取り組みが行われており、中国の瀋陽市において約10,000台のタクシープローブデータから交通状況をリアルタイムに収集し、Webサイトを通じてユーザーに現在の交通状況を提示するシステムを開発している。Chang ら [7] は、プローブカーデータから車両の加速度情報等を取得し、自動車のCO₂排出モデル [8] に適用することで、北京市内の高速道路のCO₂排出量を、時間帯及び場所ごとに推定する手法を提案している。この手法を用いることで、燃料の消費量からCO₂排出量を推定する従来型の手法と比べ、高速道路の区間ごとのCO₂排出量の違いも推定できることが示されている。Fabritiis ら [9] は、イタリアの都市部や高速道路上を走る600,000台以上のプローブカーデータを収集し、交通状況の把握や推定を行うシステムを提案している。提案手法は、ニューラルネットワークとパターンマッチングのアルゴリズムを応用した手法で、30分後の平均速度を90%の精度で推定できることを示している。さらにYokota ら [10] は、北阪神エリアを走行する約300台のトラックから得られたプローブデータを分析することで、エリア内の道路網を自動車の利用頻度に応じて2種類に分類し、それぞれの道路網における平均速度の違いやサービス水準の違いについて明らかにした。

このように、プローブカーから得られる情報を用いて都市部の交通状況を把握する研究は多数存在するものの、これらの研究は、平常時の道路交通状況を対象としたものであり、天候などの影響を考慮した取組は行われていない。

2.2 雪道における自動車交通特性に関する研究

雪道特有の自動車交通特性に関しては、土木工学の分野でいくつかの研究がなされている。例えば、梶谷ら [11] は、峠部の道路を対象とし、路面状態と道路線形などを説明変数として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。また、寺内ら [3,12,13] は、福井県内の国道を対象として雪道の走行実測を行い、無雪時と降積雪時における速度の違いについて分析し、道路の車線数の違いや消融雪装置の有無によって、交通流が

どのように変化するかを明らかにしている。また、積雪時の都心部交差点における左折車の走行実態などについても調査を行っている。さらに、堀井 [1,2] は、積雪都市内の一般道路において走行実測を行い、そのデータを基に、雪道における冬期交通流、特に旅行速度に対し統計分析を行い、積雪都市における旅行速度の予測モデルについて検討を行っている。その結果、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、その精度は、重相関係数が 0.78 という比較的良好な結果が得られている。しかしながら、これらの研究は実地走行によって自動車の速度を取得しているため、対象となる路線が限られてしまう上に、日々変化する路面状態をモデルに反映できるわけではない。

近年では、プローブカーシステムの普及に伴い、プローブカーデータを活用して雪道の特性を把握する研究もなされている。宗広ら [14,15] は、115 台分のタクシープローブデータから雪道の交通速度を分析し、札幌市の冬期交通特性分析結果例を紹介すると共に、タクシープローブデータの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したことや、路面が乾燥している際には、平均旅行速度は低下せず、一定を確保していることなどが示されている。さらに、交通シミュレーターを用いて、路面上の雪や水が交通状況に与える影響を検証する研究も行われている。Yongら [16] は、交通シミュレーター Vissim を用いて道路の交通容量をモデル化し、路面が雪や水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% になる事を明らかにした。この結果から、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。

文献 [14,15] のように、プローブカーデータを利用した雪道の研究も見られるが、これらの研究は、プローブカーデータから得られる速度データと気象データを比較分析し、速度と気象状況の関係性を考察するにとどまっている。本研究では、降雪量などの気象条件の変化が交通速度に与える影響を定量的に把握するために、気象データ交通速度の関係性を表現するモデル式を作成する。

3. 雪道交通速度推定モデル構築

本章では、気象データ及び交通データを収集し、事前処理を行う方法と、これらのデータ解析に基づく、雪道の交通速度推定モデル構築の手法について述べる。

提案手法では、収集した気象データ及び交通データを用いて重回帰分析を行うことにより、気象データ等を説明変数として、積雪期と無雪期の交通速度の低下(雪道の速度低下)を推定するモデル式を作成する。重回帰分析とは、回帰分析の説明変数を複数にしたもので、この分析を実施することにより、例えば、以下の様に雪道の速度低下を複



図 1 積雪都市の道路状況の例

Fig. 1 An example of road conditions at snow city

数の説明変数の線形和として表現する重回帰式を作成することができる。

$$\text{雪道速度低下} = a \times \text{積雪量} + b \times \text{降雪量} + c \times \text{前日降雪量} + \dots$$

3.1 節では、雪道の交通速度と気象条件の関係性について具体例と共に紹介し、3.2 節、3.3 節では、気象及び交通データの収集方法と処理手法について述べる。さらに、3.4 節では、収集したデータから速度推定モデルを構築する手法について説明する。

3.1 気象条件の変化による雪道の速度変化

一般的に、交通速度は道路上を走行する自動車の量や、信号機の有無などによって常に変化している。一方、冬季に多量の降雪を観測する積雪都市では、図 1 のように、道路上に雪が堆積することによって路面状況は悪化し、路肩に積み上げられた雪が道路の幅員を狭めている。

このような雪道においては、降雪によって積雪量が増加すれば交通速度は低下し、気温の上昇などによって積雪量が減少すれば交通速度が上昇する。このように、積雪量の変化にともなって道路の交通速度が変化する例を図 2 に示す。この図は、ある道路上を走行したプローブカーの速度から、2013 年 2 月の 1 日ごとの平均速度と同路線の無雪期の平均速度との差を、積雪量と共に示したものである。この道路においては、積雪量の増加に伴い平均速度が低下している。平均速度と積雪量との相関係数は -0.826 であり、平均速度と積雪量の間には強い負の相関関係があることから、積雪道路の平均速度は、積雪量の変化によってある程度説明可能である。また、線形回帰予測を行うことによって、積雪量から旅行速度を推定することも期待できる。

3.2 雪道の交通速度に影響を与える観測データの取得

文献 [17] において、冬期気象条件が札幌市の平均旅行速度に与える影響の分析がなされており、雪道における自動車の速度は、積雪量、降雪量や平均気温などに影響を受けて変化することが示されている。本研究では、これらの気

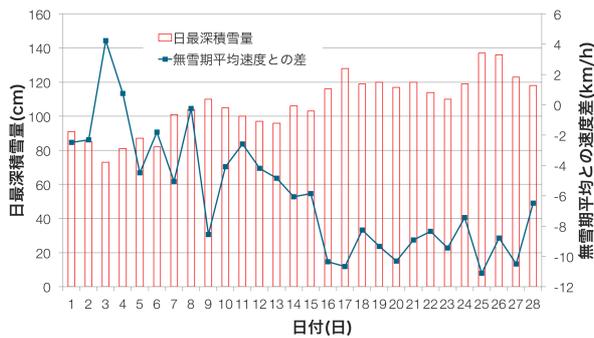


図 2 2013 年 2 月におけるプローブカーの速度と積雪量
Fig. 2 Velocity of probe cars and snow amount in February, 2013

表 1 モデル作成に使用する気象データ

Table 1 Weather data used for the proposed model

データ項目	単位	データ項目	単位
日最深積雪	cm	日最高気温	°C
降雪量日合計	cm	日最低気温	°C
日平均気温	°C	日照時間	時間

象データを雪道の速度モデル構築に利用するために、国土交通省気象庁が公開している過去の気象データ [18] の中から、表 1 に示したデータを取得する。このうち、日最深積雪とは、観測地点に自然に降り積もって地面を覆っている雪などの固形降水の深さ(積雪の深さ)を降雪計によって 1 日にわたって計測したものの内、最大の値である [19]。日最深積雪の値は、観測地点における積雪の深さを表しているため、自動車の往来や除排雪によって変化する実際の道路の積雪の深さを表しているものではない。しかし、3.1 節で示したように、日最深積雪の値は、路面の状況変化とある程度関係があると考えられるため、本研究では、この値を雪道速度推定モデルに利用している。なお、「日平均気温」「日最高気温」「日最低気温」の 3 つのデータは、データ間の相関関係が強いため、重回帰式の説明変数として用いる際にはいずれか 1 つのみを用いることで、多重共線性の問題を回避する。

3.3 プローブカーデータの収集と処理

本研究では、2 つの交差点を結ぶ道路区間を道路の最小単位として扱い、「リンク」と呼ぶ。また、複数のリンクが連なった道路区間を「路線」と呼ぶ。提案手法では、あるリンクにおける、無雪期の 1 日の平均速度に対する、積雪期の 1 日の平均速度の低下量を「速度低下」と呼び、この値を重回帰分析の目的変数として用いる。プローブカーによるデータ収集では、同じリンク上を通過した複数台のプローブカーの個々の走行情報を収集するため、リンクベースで速度低下を把握するためには、それら個々の走行情報を適切に集約し平均化する必要がある。

プローブカーシステムでは、プローブカーがリンク上を

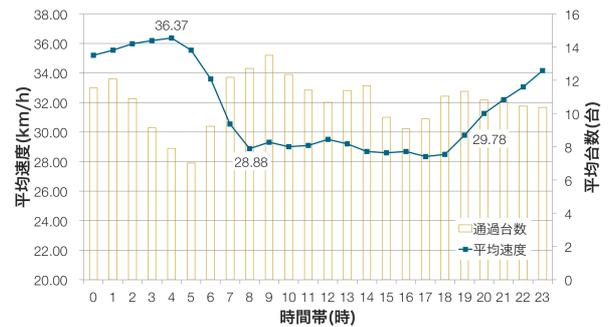


図 3 札幌市内全域における 2014 年 5 月から 10 月の 24 時間別平均速度とタクシープローブカー通過台数平均

Fig. 3 Average velocity and average number of probe cars of every 24 hours in the whole area in Sapporo-shi in March to October, 2014

走行している限り、速度情報は常に収集可能である。しかしながら、道路交通センサス [20] によれば、自動車の交通量は深夜及び早朝の時間帯において大きく減少するため、それに伴いプローブカーの速度は他の時間帯に比べて変化してしまう可能性が考えられる。よって、1 日の平均速度は交通速度が大きく変化する時間帯を除いて算出する必要がある。そこで、本研究で雪道速度モデルを作成する対象とした札幌市の時間帯別の平均速度の変化を調査するために予備調査を実施した。予備調査では、札幌市内を走行するプローブカーデータを収集し、そのデータを走行時間帯に応じて分類し、札幌市内全域の、24 時間別の平均速度を算出した。使用したプローブカーデータは無雪期(2014 年 5 月~10 月)のものとした。24 時間別の平均速度と、タクシープローブカーの通過台数平均を図 3 に示す。

図 3 に示されるように、平均速度はタクシーの通過台数が減少する早朝 4 時台で最大(36.37km/h)となり、朝 8 時台以降は約 29km/h 前後で安定して推移している。その後、夜 20 時台以降は平均速度が上昇している。そこで本研究では、8 時 00 分から 20 時 00 分までの時間帯において、あるリンク上を走行した自動車の速度の平均を、その日の平均速度とする。この時間帯の平均速度を計算することで、1 日ごとの平均速度の変化をリンクごとに記録する。

提案手法では、リンク上において、積雪による交通速度の低下を把握するために、当該地域において積雪を観測していない無雪期における平均速度を算出する。本研究では無雪期の場合、路面状況は常に変化しないと想定するが、通勤ラッシュや帰宅ラッシュの有無などの影響を受けて交通量が変化するため、交通速度は主に曜日により変化すると考えられる。曜日と速度との関係を調査するために、予備調査を実施した。予備調査では、札幌市内を走行するプローブカーデータを収集し、昼時間帯の平均速度をリンク別、日別に算出した後、そのデータを曜日に応じて分類し、札幌市内全域の、曜日ごとの平均速度を算出した。使用したプローブカーデータは無雪期(2014 年 5 月~10 月)のも

表 2 札幌市内全域における 2014 年 5 月から 10 月の曜日別平均速度

Table 2 Average velocity of each day in the whole area in Sapporo-shi in March to October, 2014)

	月	火	水	木	金	土	日
平均速度 (km/h)	30.90	30.97	31.02	31.04	30.88	31.57	32.26

表 3 目的変数と説明変数の一覧

Table 3 List of response and explanatory variable

目的変数	単位	説明変数	単位	説明変数	単位
無雪期との速度差 (速度低下)	km/h	日最深積雪	cm	前日 日最深積雪	cm
		降雪量日合計	cm	前日 降雪量日合計	cm
		日平均気温	°C	前日 日平均気温	°C
		日最高気温	°C	前日 日最高気温	°C
		日最低気温	°C	前日 日最低気温	°C
				前日 無雪期との速度差	km/h
				無雪期平均速度	km/h

のとした。なお、平日のうち、祝日に該当する日は交通状況が異なると考えられるため、集計結果には含めていない。札幌市内全域における、曜日別の平均速度を表 2 に示す。表 2 に示されるように、平日の平均速度に比べ、土曜日、日曜日の平均速度が高く、月曜日から金曜日までの平均速度の平均は 30.96km/h であるのに対し、日曜日の平均速度はそれよりも 1.30km/h 高かった。このことから、実道路上の平均速度は曜日によって変動することがわかった。よって、提案手法では、リンクごとの無雪期の平均速度を曜日別に算出し、これを気象条件の影響を受けていない時の平均速度とする。ここで、積雪期の平均速度から、同じ曜日の無雪期の平均速度を減算することによって、積雪による速度の低下を算出することができる。提案手法では、この速度低下を、雪道の交通速度を表す目的変数とする。例えば、あるリンクにおける 2 月 1 日 (月曜日) の 1 日の平均速度が 10.0km/h であり、そのリンクの無雪期の月曜日の平均速度が 25.0km/h の場合、その道路の 2 月 1 日の速度低下は -15.0km/h となる。

3.4 複数の気象データを考慮した速度推定モデル構築

3.2 節及び 3.3 節の結果から、交通速度に影響を与える複数の気象データ及び、冬季における 1 日ごとの交通速度に関するデータを収集できた。本研究では、重回帰分析によって、複数の気象データが交通速度に与える影響を評価する。重回帰分析に用いる目的変数と説明変数の一覧を表 3 に示す。各リンクにおける実データから算出した速度低下を目的変数とし、当日、前日の気象データ及び、同リンクの前日の速度低下や無雪期の平均速度を説明変数とした。なお、説明変数の中には、速度低下に影響を与えないような変数が含まれている場合がある。そこで、説明変数の選択基準として、Akaike's Information Criterion(AIC) [21] を使用し、AIC の値が最も小さくなるような説明変数の組

み合わせを探索する。これにより、必要最小限の説明変数を用いて、目的変数である速度低下を推定するモデル式を構築することができる。

4. 実データからのモデル構築と検証

本章では、札幌市内の実際のタクシープローブデータを用いて雪道の速推定モデルを作成し、提案手法に対する性能評価を行う。作成したモデルから導出した道路速度の予測値が、実測値をどれだけ正しく表現できているかを評価する。さらに作成したモデルを用いた雪道の状況評価も行う。

4.1 評価環境

本実験では、プローブカーデータとして、札幌市内を走行するプローブ車両から収集した車両位置や時刻などのプローブ情報を元に生成した交通情報を利用する。ただし、タクシーが通過しなかった時間帯の交通情報は生成されない。タクシープローブ交通情報が提供されている道路を図 4 に示す。本研究では、積雪期の交通情報として 2013 年 2 月の日別の平均速度をリンクごとに計算し、無雪期の交通情報として 2014 年 5 月～10 月の平均速度をリンクごとに曜日別に計算した。また、気象庁が提供している、札幌における 2013 年 2 月の気象データを取得した。

4.2 積雪に影響を受けやすい道路の把握

3.1 節で示したように、本研究では、雪道における交通速度と積雪量には強い相関があることを前提としている。しかしながら、実際の道路では、積雪量以外にも交通量の変動や、信号の有無など、様々な外的要因が交通速度に影響を及ぼしているため、交通速度と積雪量に強い相関が観測されないリンクも存在することが考えられる。そこで、積雪に影響を受けやすい路線を把握するための予備実験を

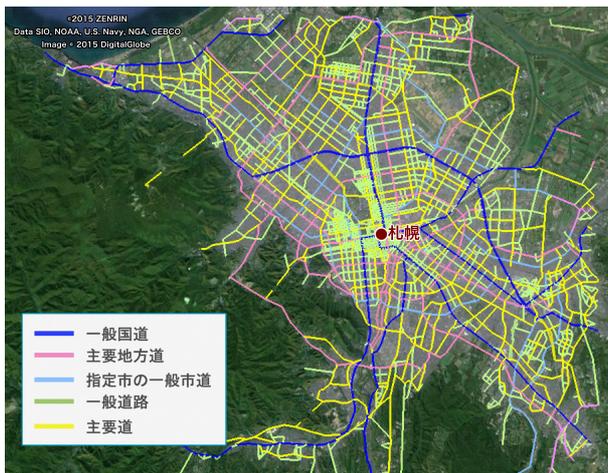


図4 タクシープローブ交通情報が提供されている道路

Fig. 4 Road map that taxi probe traffic information is provided

実施した。まず、各リンクごとの積雪期と無雪期の平均速度の差を1日ごとに計算し、2013年2月の日ごとの速度低下を記録した。この速度情報と、それが得られた日時に対応する日最深積雪量との相関係数を計算し、速度低下の値と、積雪の値との相関の強さをリンクごとに算出した。積雪の影響を受けるリンクでは、積雪の増加に伴って平均速度が減少するため、相関係数は負の値を取り、相関が強くなるほど-1に近づく。なお、本実験では、相関係数が-0.5以上のリンクについては、平均速度と積雪量との間に相関関係がないとみなしている。また、1日のうちにタクシーが一度も走行しなかったリンクは、その日の交通情報が欠落する。本実験では、有効な交通情報が20日以下のノードについては、相関係数を計算していない。

図5は、相関係数の値に応じてリンクごとに色分けを行ったものである。予備実験の結果、札幌市内全域の道路の中から、速度と積雪の相関が高いリンクを抽出することができた。このようなリンクの特徴としては、交通量の多い片側2車線以上の道路であるということが挙げられる。図5からは、速度と積雪の相関が高いリンクが複数連なっている路線が複数あることがわかる。本実験では、このような路線を対象とした速度モデルを構築する。なお、相関の高くない道路については、交通量が非常に多く、慢性的に渋滞が発生している、あるいは、タクシープローブカーの通過台数が少ないために速度のぶれ幅が大きいためといったような、降積雪以外の速度変化要因が含まれているということが考えられ、今後より詳細な分析が必要である。

4.3 実データを用いた速度モデル構築

本節では、提案手法の有効性を示すために、実データを用いて雪道の速度モデルを構築する。まず初めに、速度と積雪量との相関が特に高い樽川通りの一部区間(図6)を対象としてモデル作成を行った。なお、図6は図5中の四角で囲まれた区域を示している。

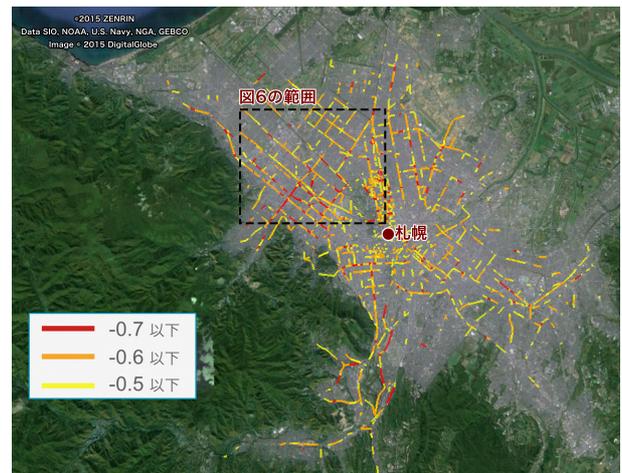


図5 2013年2月における交通速度と積雪深のリンク別の相関関係

Fig. 5 Correlation between velocity and snow amount in February, 2013



図6 モデル構築対象路線(樽川通り・路線A・B・C)

Fig. 6 Routes which the velocity model is constructed

作成したモデル式の重回帰分析結果と各パラメータに対応する係数の値を表4に示した。重回帰係数の値は0.844であり、表4に示した説明変数によって、目的変数である速度低下を十分に表現することができた。また、各パラメータが目的変数に与える影響の大きさを表すt値の絶対値は、どのパラメータについても2.0を上回っており、有意確率も十分に低いため、各パラメータは目的変数の値に有意な影響を与えていることがわかる。このことから、提案手法によって、気象条件などのデータを用いることで、雪道における速度低下をある程度推定できるということがわかった。

次に、表4に示した偏回帰係数について考察する。まず、日最深積雪の係数が負の値をとっていることから、積雪量が増加すると、それに伴い路面状態が悪化し、平均速度が低下することがわかる。降雪量についても同様である。また、前日降雪量の係数の値も負であることから、前日に降り積もった雪が翌日の交通速度にも影響を与えているこ

とがわかった。さらに、前日最高気温の係数が正となっていることから、前日の気温上昇によって路面状態が良くなり、逆に最高気温が氷点下を下回ると、路面凍結などが発生し、平均速度は低下すると推察できる。このように、作成した重回帰式を分析することで、複数の気象条件の変化が、対象路線の交通速度に与えている影響を把握することができる。

4.4 複数路線に対する速度モデル構築

道路交通情報のデータ源として、タクシードロブカーデータを用いることの利点の1つは、様々な道路の情報を広範囲に取得できるということである。本節では、速度と積雪量との相関が高い複数の路線を対象として、路線ごとにモデルを作成し、それぞれの路線ごとの特徴を把握する。本実験では、樽川通りの他、図6に示したA、B、Cの各路線を対象としてそれぞれモデル作成を行い、作成した各モデルの重相関係数と、パラメータに対する係数の値をそれぞれ表5、表6、表7に示す。これによると、重相関係数の値はどのモデルにおいても十分に大きく、適切なモデルが作成できている。さらに、4.3節の場合と同様に、パラメータに対する係数の値の符号や大きさから、路線ごとの傾向を把握することができる。例えば、樽川通りの場合は、最深積雪や降雪量の他に前日最高気温の値にも影響を受けていたのに対し、路線Aや路線Bでは、前日照時間の変化に影響を受けていることがわかる。このことから、路線Aや路線Bは比較の日当たりがよく、気温変化よりもむしろ日光の影響によって路面状況が変化していると推察できる。さらに、路線Cでは積雪量の他に前日積雪量と前日照時間に影響を受けており、他の路線とは異なった傾向を示している。

このように、複数の路線に対してモデル式を作成することによって、気象条件の変化に受ける影響の違いを路線ごとに把握することができると考えられる。しかしながら、雪道の平均速度は、道路工事や渋滞などの突発的な事象の発生や、除排雪の実施等によっても変化する。今回作成したモデル式はこれらの事象を考慮することができていないため、今回得られた結果が実際に路面ごとの傾向の違いを表現しているかについては、さらなる検証が必要である。

5. おわりに

本研究では、タクシードロブカーデータから得られる道路交通統計情報及び、降積雪などの気象データを分析することによって、雪道における道路交通速度の低下量を推定するモデルを構築する手法を提案した。

また、提案手法の有効性を評価するために、実際に計測されたタクシードロブカーデータ及び気象データを基に速度推定モデルを構築し、札幌市内の実道路上において、提案したモデル式によって雪道の速度低下を推定できることを

表4 モデルの重相関係数と偏回帰係数(樽川通)

Table 4 Multiple correlation coefficient and partial regression coefficient (Tarukawa-street)

重相関係数	0.844		
項目	値	t 値	有意確率
定数項	8.07089	6.095	1%有意
日最深積雪	-0.04699	-4.632	1%有意
降雪量	-0.04528	-2.489	5%有意
前日降雪量	-0.05389	-3.086	1%有意
前日最高気温	0.20736	4.388	1%有意
前日速度差	0.63244	19.765	1%有意
無雪期速度	-0.20180	-6.984	1%有意

表5 モデルの重相関係数と偏回帰係数(路線 A)

Table 5 Multiple correlation coefficient and partial regression coefficient (Route A)

重相関係数	0.813		
項目	値	t 値	有意確率
定数項	10.41786	6.208	1%有意
日最深積雪	-0.07111	-6.432	1%有意
前日照時間	0.17267	3.007	1%有意
前日速度差	0.50930	10.423	1%有意
無雪期速度	-0.28235	-6.541	1%有意

表6 モデルの重相関係数と偏回帰係数(路線 B)

Table 6 Multiple correlation coefficient and partial regression coefficient (Route B)

重相関係数	0.832		
項目	値	t 値	有意確率
定数項	15.68792	6.441	0%有意
日最深積雪	-0.13449	-7.376	0%有意
前日照時間	0.25251	2.995	1%有意
前日速度差	0.48708	9.086	0%有意
無雪期速度	-0.27692	-5.300	0%有意

表7 モデルの重相関係数と偏回帰係数(路線 C)

Table 7 Multiple correlation coefficient and partial regression coefficient (Route C)

重相関係数	0.775		
項目	値	t 値	有意確率
定数項	7.27872	3.592	0%有意
日最深積雪	-0.07514	-4.388	0%有意
前日降雪量	-0.12501	-3.424	0%有意
前日照時間	0.31869	3.706	0%有意
前日速度差	0.59574	13.113	0%有意
無雪期速度	-0.12462	-3.498	0%有意

示した。さらに、複数の路線に対してモデル作成を行うことで、路線ごとの、交通速度が気象条件の変化に受ける影響の違いについて検証した。

今後の課題としては、交通量の変化、信号機の有無や道路の有効幅員といった、道路交通速度に影響を与える

様々な要因も考慮したモデルを作成し、モデル精度の向上を行っていく必要がある。より精度の高いモデルを作成することができれば、降積雪が道路交通に与える影響を定量的に評価し、除排雪計画策定の際の情報提供にも活用できるだろう。さらに、スマート除排雪プロジェクトに本研究で提案した手法を組み込むことにより、積雪都市における除排雪の効率化を実現する技術の一翼を担っていきたい。

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。

参考文献

- [1] 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).
- [2] 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).
- [3] 義典寺内，泰広三村，哲男加藤，義明本多：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).
- [4] Liu, S., Pu, J., Luo, Q., Qu, H., Ni, L. and Krishnan, R.: VAIT: A Visual Analytics System for Metropolitan Transportation, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 14, No. 4, pp. 1586-1596(2013).
- [5] Wang, W. and Mizuta, H.: Probe car based traffic information system experiment in shenyang, *Proceedings of 8th International Conference on ITS Telecommunications*, pp. 334-336 (2008).
- [6] Hellinga, B. R.: Estimating Dynamic Origin-Destination Demands from Link and Probe Counts, PhD Thesis, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada (1994).
- [7] Chang, X., Chen, B. Y., Li, Q., Cui, X., Tang, L. and Liu, C.: Estimating Real-Time Traffic Carbon Dioxide Emissions Based on Intelligent Transportation System Technologies, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 14, No. 1, pp. 469-479 (2013).
- [8] Davis, N., Lents, J., Osses, M., Nikkila, N. and Barth, M.: Part 3: Developing countries: development and application of an international vehicle emissions model, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1939, No. 1, pp. 155-165 (2005).
- [9] de Fabritiis, C., Ragona, R. and Valenti, G.: Traffic estimation and prediction based on real time floating car data, *Proceedings of the 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, Beijing, China, pp. 197-203 (2008).
- [10] Yokota, T. and Tamagawa, D.: Constructing Two-Layered Freight Traffic Network Model from Truck Probe Data, *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, Vol. 9, No. 1, pp. 1-11 (2011).
- [11] 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).
- [12] 義典寺内，誠史宇佐美，義明本多：積雪時における道路交通管理のための交通特性に関する調査研究，日本雪工学会誌：journal of snow engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 203-210 (1999).
- [13] 泰広三村，義典寺内，泰榮 李，義明本多：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).
- [14] 宗広一徳，高橋尚人，浅野基樹：タクシード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).
- [15] 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ドータの活用 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).
- [16] 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).
- [17] 高橋尚人，宗広一徳，浅野基樹：冬期気象条件が札幌市の平均旅行速度に与える影響分析，雪と道路の発表研究会(2004).
- [18] 国土交通省気象庁：過去の気象データ。
<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>.
- [19] 国土交通省気象庁：積雪計/観測の原理。
http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kansoku_guide/e1.html.
- [20] 道路交通センサス：平成22年度一般交通量調査集計表。
<http://www.mlit.go.jp/road/census/h22-1/>.
- [21] Akaike, H.: Information theory and an extension of the maximum likelihood principle, *Selected Papers of Hirotugu Akaike*, Springer, pp. 199-213 (1998).