

冬期道路条件を考慮したミクロ交通シミュレーションの開発

都市交通研究室
19108089
鷲津晃平

1. 研究背景

近年、降雪量の増加に伴い豪雪地域の高速道路や幹線道路で大規模な車両の長期滞留が発生しており大きな問題となっている。車両の長期滞留は、人命に関わるだけでなく、物流が滞ることで社会、経済活動の大きな影響を及ぼしている。新潟県においては、2020年12月16日から18日、関越自動車道の月夜野IC～小出ICで発生した事例や2022年12月19日から21日、国道8号(柏崎地区)、国道8・17号(見附市～長岡市)で発生した事例などが挙げられる。こうした問題を背景に、冬季の車両滞留発生を未然に防ぐため、各種道路の予防的な通行止めによる集中除雪や広域迂回を促す情報提供等の対策が各所で講じられている¹⁾。また除雪活動等に関しては熟練オペレーターの高齢化や労働人口減少等の問題が懸念されていることから、作業体制の省力化・効率化が必要である。そこで、交通施策の検討に用いられる交通シミュレーションを活用し、除雪車の経路や台数、作業時間などの除雪計画の最適化や効果的な予防的通行止めを行うことで、道路ネットワーク全体の車両滞留の抑制と通行止め時間の最小化を図り、安心安全で円滑な道路機能の確保と共に、道路管理者の道路機能維持業務の効率化につながると考えている。

2. 既往研究の整理と研究目的

2.1. 既往研究の整理

本研究は、降雪による路面の悪化といった冬期道路条件下において、除雪計画や通行止めといった交通施策を検討できるような交通シミュレーションの開発を目的とした研究である。本研究を行うに当たり関連する既往研究について、2つ観点から整理したものを以下に示す。

1) 冬期道路環境が道路交通に与える影響に関する研究

武知ら²⁾は冬期道路環境がドライバーの運転へ及ぼす影響について、降雪日と無降雪日で被験者走行実験を行い、道路線形等の影響と路面状況と走行速度の関係を分析している。結果は、道路線形による影響として、積雪期の平均走行速度は直線区間に比べ低下し、特に、カーブ区間かつ曲線半径が400m以下の区間でより顕著に減少する傾向があると報告している。路面状況

と走行速度の関係については、路面状況の違いによる速度低下はみられなかったと報告している。しかし、観測中に発生しない路面があったことから、データを増やし検証する必要があると考察している。

伊藤ら³⁾はETC2.0プローブデータを用いて、冬期道路交通状況への雪の影響と要因を分析している。分析結果から、降積雪は旅行速度へ影響を及ぼしていると明らかにしている。旅行速度への影響を道路の種類や信号交差点密度等の道路構造の観点からみると、路面状況の悪化は高速道路や一般道路の立体区間といった高速度域の道路と信号交差点密度の高い区間で大きく影響が出ると考察している。また、この知見を基に、費用便益分析を通して、降積雪地域における道路整備評価手法を検討している。具体的には、路面状態悪化による損失をSP調査から推定した冬期時間価値と、信号交差点の総遅れ時間から算出し、除雪方法による便益を評価している。しかし、信号交差点の遅れ時間の算出はWebsterの式を用いているため、過飽和状態を考慮できていない。改善案として、交通シミュレーションを適応することで分析可能になると報告している。

大島ら⁴⁾は路面状態が交差点における車両の発進、停止及び走行に与える影響を調査している。走行・発進時の車頭時間や発進損失時間、飽和交通流率、交通容量といった信号交差点の交通状況に関する項目を夏期と冬期で比較している。冬期は夏季より、飽和交通流率と交通容量は低下し、車頭時間や発進損失時間は増加している。路面状況の悪化に伴って、遅れ時間が増加することや交差点機能が低下することを明らかにしている。

Songhua⁵⁾らは極端な気象条件下での道路交通流の変化を調査している。速度変化、気象状況の継続時間といった指標から洪水、大雪、霧の3つの気象現象がリンクレベルの交通変化と回復状況に与える影響を評価したところ大雪が最も交通を悪化させ、その影響が長時間継続することを明らかにした。極端な気象条件下での道路交通分析は道路輸送システムにおける防災対応、復旧の観点から重要であると報告している。

Jianchengら⁶⁾は通常時と降雪時の交通流特性を比較し、降雪が高速道路の交通量と平均速度に

与える影響を定量的に示した。結果として、降雪時は通常時よりも平均速度が 10~20km/h 低下し、車頭間隔は2~4秒増加し、交通容量は約33%減少することが分かったと報告している。交通流パラメータを把握することが大雪時の交通管理、道路規制の検討に必要な不可欠であるため、様々な積雪強度でのデータの収集・分析が必要であると考察している。

Ahmedら⁷⁾は冬季の安全な道路環境を維持する上で路面状況が重要な役割を果たしていることに着目し、路面の摩擦係数と交通安全の関係性について分析している。分析結果から、路面摩擦係数が0.6以上の時、著しく安全性が高く、0.35未満で危険性が顕著に増加すると考察している。また、同じ路面状況でも生活道路よりも幹線道路の方が、危険性が高く除雪作業の優先度の重要性を報告している。

2) 冬期交通状況を考慮した交通シミュレーションに関する研究

岡上ら⁸⁾は交通障害発生時の交通流動の把握を目的として、マクロ交通シミュレーションとミクロ交通シミュレーションを統合した交通シミュレーションを構築している。事故や雪、除雪作業などの交通障害発生時はミクロ交通シミュレーションを用いるべきと論じている。シミュレーションは高速道路の単路部で現況再現しており、全体の交通需要の増減が推計値と観測値で似ていたため、シミュレーションの計算性能を保持しつつ、交通障害発生時の交通流動の的確な推計ができたことを報告している。

宗広ら⁹⁾は冬期交通状況の実態把握と予測手法の確立を目的とし、航空写真や車両追従実験から冬期車両追従モデルを作成し、ミクロ交通シミュレーションによる冬期道路交通流の現況再現を行っている。冬期路面状態で行った追従実験の結果を用いて、冬期の車両挙動を再現している。対象地域は札幌市都市圏とし、信号現示や車線、速度規制、右左折規制といった道路構造を考慮したシミュレーションとなっている。夏期と冬期で異なる車両追従モデルを用いることで、平均旅行速度の変化を表現している。シミュレーション結果と観測値を比較すると、概ね実際の車両挙動を再現できているものの、車両追従実験結果と現況の路面状況が乖離していると、シミュレーション精度が低下してしまうことが今後の課題であると報告している。

このように、既往研究から既存の交通シミュレーションでは、降雪や路面状態といった冬期道路環境や除雪作業の影響を考慮することができない

ため、それらを考慮するには新たに交通シミュレーションを開発することが必要であると言える。既往研究で用いられているシミュレーションは、モデルが簡易的かつ地域限定的であり、交通施策の検討など実務での活用を見据えたものは少ない。そこで、既存の交通シミュレーションで利用されているモデルを拡張、変更する、また、利用できない場合は新たにモデルを作成し、冬期交通状況を再現した交通シミュレーションを開発する。

2.2. 研究の目的

前節の研究背景・既往研究を踏まえて、本研究では、豪雪時の交通施策の検討を目的とし、冬期道路条件を考慮した交通シミュレーションを開発する。既存の交通シミュレーションでは考慮されていない冬季道路交通状況や除雪作業に関するモデルを新たに作成する、既存のモデルを改良するなど交通シミュレーションを冬季道路交通に特化させる。冬季道路交通状況に関しては、ミクロ的な車両挙動、特に車両速度に着目し、冬季の車両速度の変化に影響する要因の分析を行うとともに、シミュレーションで用いる速度推定モデルを作成する。作成した交通シミュレーションを用いて、効果的な除雪作業計画について検討する手法を提案する。

3. ミクロ交通シミュレーションの概要

3.1. シミュレーションのスキャン方法

シミュレーション内の時計の進め方は、大きく分けて2種類ある。一つは、一定の周期でスキャンし車両の走行状態を更新するピリオディック・スキャン方式で、もう一つは、対象とする事象の処理を実行する度にスキャンを行うイベント・スキヤニング方式である。本研究では、降積雪によって逐次的に変化する車両挙動を表現するため、ピリオディック・スキャン方式を採用する。スキヤンの実行は1秒毎に行い、1秒ごとに車両の位置を記録し、各リンク終点に到達した際には、所要時間も記録する。一定周期でスキャンを実行することで、事故やスタックによる通行止めといった交通状況に応じて不定期に発生する事象に対しても処理をすることが可能になる。

3.2. 対象ネットワーク

シミュレーションを行うネットワークは、2020年に長期滞留が発生した区間である関越自動車道の月夜野IC~小出IC区間と通行止めをした際に迂回経路となりうる国道17号、国道291号を対象とした。図-3.1に示すように、シミュレーション

の処理時間を考慮して上記以外の道路を削除し、ノードの位置は、対象区間内にある IC と国道 17 号に位置する交差点、IC と国道繋ぐ交差点のみとした最低限のネットワークを構築した。

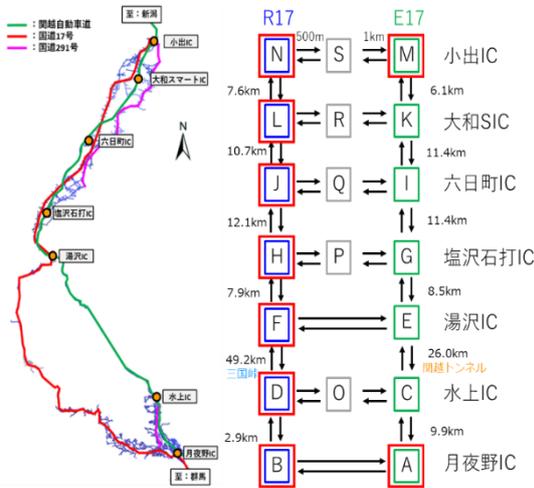


図-3.1 対象ネットワーク

3.3. 入力データ

入力データとして、冬期の道路交通状況を再現するため、降雪量、気温、風速等の気象データは観測地点ごとなので、各リンクに最も近いデータをマッチングさせた。道路環境データは道路環境の距離変化と時間変化を鑑みて車線別で 30 分 500m ごとで設定した。道路構造は道路構造データに基づき、勾配、曲率等を設定した。

交通需要データは、ETC2.0 プローブデータから推計した OD 交通量を用いた。本研究では、信号制御など新たに導入したモデルの処理が適切に実行されているかを確認するため、交通需要データは OD 交通量を基に任意で変化させた。

各リンクの道路構造データについて、リンク延長は、「全国デジタル道路地図データベース標準データ」を参照した。速度規制は、Google Map のストリートビューで規制速度標識を目視で確認し、標識のない場合は法定速度で設定した。交通容量はリンクを一般道山地部、一般道平地部、高速道路、ランプ部といった道路構造別に分類し設定した。

信号制御に必要な信号現示データは、新潟県警察から提供して頂いた信号現示表を基に、信号交差点であるノード毎に作成した。

3.4. シミュレーションの基本構成

図-3.2 はシミュレーションの大まかなフローチャートである。本研究で開発するシミュレーションは雪による遅れ時間の比較検討を目的としてい

る。交通量や道路構造、気象状況等の入力データを読み込み、分割配分法を用いて OD 交通量を最短経路に配分を行い、個車ごとに OD を決定する。その後、気象状況や道路状況に応じて希望走行速度や加速度を算出し車両位置を更新していく。既存の一般道の交差点では信号処理、除雪作業が行われた場合は路面の回復を再現し、雪による道路環境の悪化を考慮したシミュレーションを作成する。既存の交通シミュレーションでは、車両挙動に関して QV の関係や道路線形や交通密度を説明変数とした重回帰モデル等で再現しているが、雪の影響を考慮できないため新しく速度推定モデルの作成や既存のモデルのパラメータの変更を行っている。以後既存のマイクロ交通シミュレーションと大きく異なる車両挙動モデルや車両挙動に寄与するモデルに関して中心に説明する。

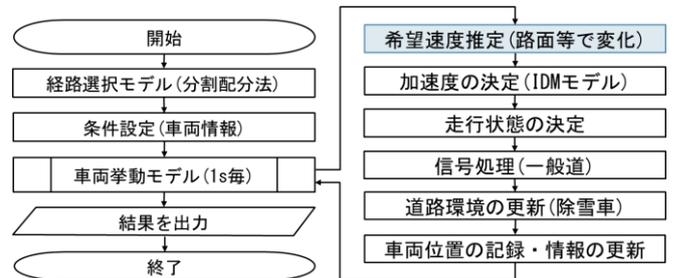


図 3-2 シミュレーションフロー

4. 希望走行速度推定モデルの作成

4.1. 分析方法

任意の時間・地点での道路構造条件・気象条件・道路環境条件等に対応した統合型速度推定モデルの作成において、本研究では以下のような速度変動要因を考慮する。

道路構造条件：平面線形、縦断勾配、縦断曲線

気象条件：気温、風速、降水量、降雪量

道路環境条件：路面状況、側方余裕幅、路肩雪堤、中央分離帯雪堤

車両条件：車種

本研究では、車両の自由走行時の速度推定が目的のため、交通量や大型車混入率等の交通条件は考慮しない。2 章で示したように、冬期道路環境における車両速度の変動には様々な要因が影響を及ぼしている。中でも特に、路面状況や降雪量といった冬期特有の条件は、他の要因と比較してもより大きく影響していると考えられる。加えて、路面状況・降雪状況の悪化に伴い、他の変数の影響度合いは異なると考える。そこで、本研究では分析方法として線形回帰モデルではなく、階層線形モデルを使用する。階層線形モデルはマルチレ

ベルモデルの一つで、階層性のあるサンプルに対して、グループ間の相関を考慮して回帰分析を行うことが出来る。線形回帰モデルとの違いとして、グループ間で固定の値の固定効果とグループ間で異なる値のランダム効果を切片とパラメータに設定することが出来る点が挙げられる。グループ間の分散や有意性等のモデルの推定結果から、必要に応じて路面毎にランダム効果を設定することで、冬期道路環境間の異質性を考慮した統合型速度推定モデルを作成する。

4.2. 分析データ

本研究で使用するデータは、交通データ、道路構造データ、気象データ、道路環境データである。以下に分析の対象区間・期間、使用データの概要、分析データの作成方法について説明する。

a) 分析対象道路及び期間

新潟県内の関越自動車道の本線部を対象道路、2022年12月から2023年3月を対象期間としてモデルを作成する。ただし、道路区間、期間ともに路面データの該当するデータのみ参照し、その他のデータは分析に使用しないものとする。

b) ETC2.0 プローブデータ

本研究では、任意地点・時間の速度推定を目的としているため、国土交通省北陸地方整備局長岡国道事務所より提供して頂いたETC2.0プローブデータの走行履歴に記録されている速度を分析に使用した。対象期間は、GPS時刻の値に、対象となる区間はDRM(デジタル道路地図)のノード番号に基づいてデータを抽出した。

c) 道路構造データ

対象道路の縦断曲線・縦断勾配・平面線形データは、東日本高速道路株式会社から提供して頂いたデータを使用した。ETC2.0プローブデータの位置情報に対応した道路構造条件を用いることで、道路構造が車両の速度変動にどのような影響を及ぼしているか分析することができる。

d) 気象データ

気象データも東日本高速道路株式会社より提供して頂いたものを分析に使用した。気温、降水量、降雪量、風速が10分毎に高速道路のICやSA毎に記録されている。道路構造と同様に、任意地点・時刻における気象条件が車両の速度変動にどのような影響を及ぼしているか分析することができる。

e) 道路環境データ

道路環境データは、中村ら¹⁰⁾が作成したデータを提供して頂いた。車上から撮影した路面画像を用いて、路面別で15段階に分類した教師データを基に、AIで路面状況を自動で判別した結果を使用した。データには、画像の撮影時刻、位置情報、路面や側方余裕幅等の道路環境が記録されている。車上から撮影した路面画像が元のデータとなっており、データ

の区間と時刻が連続しておらず偏りがある。そのため、時間的空間的な道路環境の変動を考え、30分毎500m毎にデータを集計して分析に用いた。表-4-1は道路環境データに記録されている路面状況の区分分けである。

表-4-1 道路環境データの路面状況の区分

①乾燥	⑥湿雪1cm-3cm	⑪乾雪1cm-3cm
②濡れ	⑦湿雪3cm-5cm	⑫乾雪3cm-5cm
③水たまり	⑧湿雪5cm-10cm	⑬乾雪5cm-10cm
④冠水	⑨湿雪10cm以上	⑭乾雪10cm以上
⑤薄雪	⑩凍結	⑬圧雪

f) データクレンジングについて

本研究では、車両の自由走行時の速度推定が目的のため、自由走行速度のみを抽出する必要がある。ゆえに、追従走行車や除雪作業、事故による交通規制によって走行速度が低下している車両のデータは除去しなければならない。データクレンジングに用いた各種データも東日本高速道路株式会社より提供して頂いたものを使用した。

追従走行車の除去は、ETC2.0プローブデータが約10秒毎200m毎に観測されていることから、GPS時刻を基準時刻として前10秒の間に前方250mの範囲に車両が存在している場合はデータを除外するようにして行った。

除雪作業時のデータの除去は、除雪車のGPSログデータを用いて行った。データの精度を考慮して、10分毎100m毎に集計し、対象期間・区間に存在しているETC2.0プローブデータを取り除いた。事故による交通規制時のデータの除去は、事故データを用いて、期間は規制時間を参照し、区間は事故発生地点から前後500mの範囲で除去した。また、ETC2.0プローブデータに走行車線の記載がないため、片側車線のみ規制されている場合でもデータを除去した。

5. 速度推定モデルについて

5.1. モデル作成のフロー

本研究では、python3.9を使用し、statsmodelsを用いて速度推定モデルを作成する。まず、目的変数と切片のみのNullモデルで階層線形回帰分析を行い、モデルの階層化の有意性について検討する。階層線形回帰の切片はランダム効果になっており、路面状況別に異なる値を取る。推定結果を比較する指標として、ICC(級内相関係数)とDE(デザインエフェクト)を用いる。ICCとDEの導出方法を以下に示す。

$$ICC = \frac{\sigma_{intercept}^2}{\sigma_{intercept}^2 + \sigma_{slope}^2 + \sigma_{residual}^2} \quad (1)$$

$$0 \leq ICC \leq 1$$

$$DE = 1 + (\bar{n} - 1) * ICC \quad (2)$$

ここで、

$\sigma_{intercept}^2$: ランダム効果(切片)の分散

σ_{slope}^2 : ランダム効果(傾き)の分散

$\sigma_{residual}^2$: グループ内の分散(残差分散)
 \bar{n} : 各グループ内の平均データ数

ICC はグループ内の類似度を表す。値が 0.1 以上の場合、階層線形回帰モデルを適用するべきである。DE は ICC に対し、グループ内のサンプルサイズの影響を考慮したものである。値が 2 以上の場合、階層線形回帰モデルを適用するべきである。ICC と DE のどちらかが条件を満たした場合は階層線形回帰モデルを適用すべきであるが、条件を満たさない場合でも線形回帰モデルと結果を比較して、推定結果が改善されていれば階層線形回帰モデルを適用する。

次に、モデル作成に用いる説明変数の選定を行う。階層線形回帰モデルの変数の選定は切片のみランダム効果で、その他の説明変数は固定効果で変数の選定を行う。一般的に変数選定方法は、ステップワイズ法や Lasso 回帰など様々なアルゴリズムが利用されているが、階層線形回帰モデルではこの後ランダム効果を検討するため利用するのは適切でない。変数の選定は VIF(分散拡大要因)が 10 を超える場合、多重共線性があるとみなし対象の変数を棄却する。また、線形回帰モデルと同様に、p 値を用いた有意性の検討やモデルの適合度を表す決定係数、AIC(赤池情報基準)、BIC(ベイズ情報基準)を用いたモデルの評価も行い、説明変数を取捨選択する。但し、決定係数に関しては一般的に用いられる決定係数を使うことができないため、擬似決定係数と条件付き決定係数を用いてモデルに対する説明変数の説明力を評価する。一般的な決定係数は以下の式で表される。

$$R^2 = \frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{(1 - R^2)(n - 1)}{n - k - 1} \quad (4)$$

ここで、

R^2 : 決定係数 R^2 : 自由度調整済み決定係数
 y_i : 実測値 k : 自由度(定数項含む)
 \bar{y} : 実測値の平均 n : データ数(観測数)
 \hat{y}_i : モデルによる予測値

上記の導出式から決定係数は、データ全体の変動に対して回帰変動がどれだけ多いか、つまり、データ全体の変動に対して残差の変動がどれだけ少ないかを表していると言える。しかし、階層線形回帰モデルでは、グループ分けされ、モデル内の分散が固定効果とランダム効果の 2 種類あり、全体の分散がグループに分散している。そのため、階層線形回帰モデルでは、全体の分散を用いるのではなく、固定効果とランダム効果の分散の影響を分けて考慮する必要がある。擬似決定係数は、モデルの固定効果がデータをどれだけ説明しているかを表す。条件付き決定係数は、固定効果とランダム効果がデータをどれだけ説明しているかを表す。擬似決定係数と条件付き決定係数は以下の式で表される。

$$R_{marginal}^2 = \frac{\sigma_{fixed}^2}{\sigma_{fixed}^2 + \sigma_{random}^2 + \sigma_{residual}^2} \quad (5)$$

$$R_{conditionl}^2 = \frac{\sigma_{fixed}^2 + \sigma_{random}^2}{\sigma_{fixed}^2 + \sigma_{random}^2 + \sigma_{residual}^2} \quad (6)$$

ここで、

$R_{marginal}^2$: 擬似決定係数
 $R_{conditionl}^2$: 条件付き決定係数
 σ_{fixed}^2 : 固定効果による分散
 σ_{random}^2 : ランダム効果による分散
 $\sigma_{residual}^2$: 残差分散

その次に、説明変数のパラメータのランダム効果を検討する。各変数を固定効果にした場合とランダム効果にした場合で比較し、AIC(赤池情報基準)、BIC(ベイズ情報基準)が最も良い説明変数の組み合わせのモデルを求める。

5.2. モデル構造

まず、速度推定モデルに使用する回帰データについて説明する。表-5.1、表-5.2 は、回帰データを路面状況毎のサンプルサイズと車両台数である。サンプルサイズは路面毎で大きく偏りがあり、路面の出現率の違いが顕著に出ている。路面毎のサンプルサイズの最小値は 355 で、全体の約 0.03% と非常に少ない。階層性のあるデータを分析する際に、グループ別で分けて分析するという対処方法があるが、今回の場合、分析の際の階層性の問題は解決できるが、データが大幅に損失してしまう。ゆえに、路面毎のサンプルサイズの傾向から階層線形回帰モデルにすることが適切であると予想できる。路面毎の車両台数に関しても、サンプルサイズと同様の傾向がある。1 台当たりのサンプルサイズは、路面毎で約 1~30 と偏りがあり、こちら路面の出現率が影響していると考えられる。

表-5.1 各路面のサンプルサイズ

路面状況	大型車	小型車	合計
乾燥	203,715	94,229	297,944
濡れ	326,241	225,969	552,210
水たまり	15,587	7,184	22,771
冠水	3,517	1,773	5,290
薄雪	12,954	6,170	19,124
湿雪1~3cm	41,742	27,123	68,865
湿雪3~5cm	5,915	3,977	9,892
湿雪5~10cm	585	367	952
湿雪10cm以上	141	214	355
凍結	19,931	6,887	26,818
乾雪1~3cm	28,992	9,341	38,333
乾雪3~5cm	24,785	9,114	33,899
乾雪5~10cm	3,862	1,626	5,488
乾雪10cm以上	14,873	4,043	18,916
圧雪	6,243	2,783	9,026
合計	709,083	400,800	1,109,883

表-5.2 各路面の車両台数

路面状況	大型車	小型車	合計
乾燥	7,258	16,356	23,614
濡れ	11,534	19,771	31,305
水たまり	1,439	3,846	5,285
冠水	476	962	1,438
薄雪	1,083	2,834	3,917
湿雪1~3cm	3,285	5,745	9,030
湿雪3~5cm	716	1,324	2,040
湿雪5~10cm	181	308	489
湿雪10cm以上	99	59	158
凍結	1,640	4,876	6,516
乾雪1~3cm	1,769	6,132	7,901
乾雪3~5cm	1,483	5,236	6,719
乾雪5~10cm	504	1,159	1,663
乾雪10cm以上	815	2,812	3,627
圧雪	715	1,563	2,278
合計	32,997	72,983	105,980

最小グループの大型車の湿雪 10cm 以上でも、141 サンプル、99 台分のデータを取得できていることから、分析に使用するデータとして大きな問題はないと考える。

次に、速度推定モデルに使用する説明変数について説明する。速度推定モデルの作成に使用する変数の詳細を表-5.3 に示す。ダミー変数がすべて 0 の場合は、縦断曲線の変化がなく、側方余裕幅が十分にあり、雪堤が無い状態である。説明変数の候補のうち p 値や AIC 等の推定結果を鑑みて、最もモデルの当てはまりの良くなる変数を採用する。

表-5.3 モデルに使用する変数

変数名	単位	備考
車両速度	km/h	自由走行速度
勾配変化率	%	上り:正, 下り:負
曲率	1/R	R:曲線半径(直線は∞)
縦断曲線	ダミー	サグ, クレスト, 凸のクレスト以外, 凹のサグ以外
降水量	cm/h	1時間平均
降雪量	cm/h	1時間, 3時間, 6時間平均
最大風速	m/s	1時間単位
気温	°C	1時間単位の平均気温, 最大気温
側方余裕幅	ダミー	やや狭い, 狭い
路肩雪堤	ダミー	低い, やや高い, 高い
中央分離帯雪堤	ダミー	低い, やや高い, 高い

平面線形の度合いを表す曲率は、クロソイド区間の場合以下の式で導出している。4つのパターン全てをダミー変数とし、全て 0 の場合は縦断勾配の変化点のない区間を示す。

$$\frac{1}{R} = \frac{A^2}{L} \quad (7)$$

サグやクレストなど縦断曲線を表すダミー変数の詳細を図-5.1 に示す。

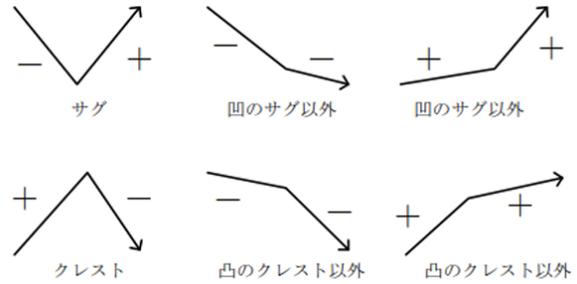


図-5.1 縦断曲線のダミー変数

5.3. 推定結果

4. (1) で示したモデル作成のフローに基づいて、車種別で作成したいくつかのモデルを比較し、最も当てはまりの良い速度推定モデルの作成を目指す。作成したモデルの推定結果を表-6 に示す。以後表-6 を参照しながら推定結果の説明を進めていく。

まず、一般的な線形回帰について、説明変数は表-5.4 で示したものに加えて、15 段階の路面状況をダミー変数として組み込んだ。推定結果は、自由度調整済み決定家数が大型車は 0.060、小型車は 0.253 と説明変数がモデルを十分に説明できていないと言える。VIF は問題なく、多重共線性はないと考えられるが、残差の自己相関の有無を判別する Durbin-Watson 値が大型車は 0.397、小型車は 0.347 で、2 より非常に小さいため、残差に正の自己相関があり、モデルの信頼性が低いことが分かる。ゆえに、推定結果からも本研究で、一般的な線形回帰モデルを使用することは適切でないと理解できる。

次に、目的変数と路面毎に変化するランダム切片のみの Null モデルについてである。Null モデルは説明変数を排除したモデルのため、AIC や BIC の比較は行わず、ICC と DE の値からモデルの階層化の有意性について検討する。ICC は大型車が 0.2、小型車が 0.468 と閾値 0.1 を大幅に超えている。DE は大型車が 9467、小型車が 12512 とこちらも閾値 2 を大幅に超えている。DE は ICC にグループ内のサンプル数を考慮しており、今回使用したデータのサンプル数が非常に多いため、理論通りの結果になったと考える。以上のことから、今回の速度推定モデルの作成において、階層化の有意性が確認できたので、マルチレベルモデルである階層線形回帰モデルを採用するべきであると言える。

Null モデルに説明変数をグループによらず全体で共通の固定効果として追加したのが、ランダム切片モデルである。説明変数としてモデルに組み込む際、ダミー変数以外の説明変数は、固定効果とランダム効果の両方に設定する可能性があり、その際にデータ全体の個々の車両への影響と路面毎での個々の車両への影響を分けて考えるために、データから路面別のグループ平均を引いて、集団平均中心化を行う。これにより、変数を固定効果した際には、路面によらない個車レベルの速度変化をランダム効果にした

表-5.4 各モデルの推定結果

回帰

		AIC	BIC	R ²	marginal R ²	conditional R ²	ICC	DE
大型車	線形回帰モデル	4,839,642	4,840,032	0.060	-	-	-	-
	Nullモデル	4,852,358	4,852,392	-	0.000	0.182	0.182	8,604
	ランダム切片モデル	4,793,183	4,793,436	-	0.047	0.225	0.187	9,366
	ランダム切片傾きモデル	4,687,922	4,688,277	-	0.030	0.569	0.069	3,207
小型車	線形回帰モデル	3,179,921	3,180,292	0.253	-	-	-	-
	Nullモデル	3,213,416	3,213,448	-	0.000	0.403	0.403	10,780
	ランダム切片モデル	3,156,494	3,156,734	-	0.192	0.407	0.267	7,582
	ランダム切片傾きモデル	3,083,810	3,084,147	-	0.118	0.667	0.157	4,119

際には、路面毎の個車の速度変化の影響を比較検討することが出来るようになる。ランダム切片モデルの推定結果は、線形回帰モデルやNullモデルと比較すると、大型車と小型車ともに、AICやBICが減少しておりモデルの当てはまりが良くなったと言える。決定係数は線形回帰モデルよりも増加している。本モデルにおいて、グループ差が推定結果に大きな影響を及ぼしていると考えられる。VIFは問題なく、多重共線性は考えにくい。また、各説明変数のp値は、有意水準5%を満たしており、線形回帰モデルからランダム切片モデルにしたことによる変化は確認できなかった。

最後にランダム切片モデルの説明変数の傾きも路面毎で変化させたランダム傾きモデルについてである。説明変数もランダム効果に設定したことで、大型車と小型車ともにAICやBIC、決定係数が大幅に改善した。一部変数をランダム効果に加えたことで、固定効果の分散の影響を表す擬似相関係数が減少し、ランダム効果と固定効果の影響を表す条件付決定係数が増加した。このことから、路面毎に道路構造や気象、道路環境条件が車両の自由走行速度に及ぼす影響は、路面毎に異なっていると言える。

(4) 推定結果の考察

表-5.4で示したモデルの推定結果から最も当てはまりの良いランダム切片傾きモデルの推定結果の詳細から車種毎に各説明変数が車両の自由走行速度に与える影響について考察する。固定効果に設定した変数は全体の平均的な速度の変動を表し、ランダム効果に設定した変数はグループごとの速度の変動を表す。固定効果間はVIF、ランダム効果間は相関行列を用いて変数間の相関関係を考慮した上で、p値が有意である変数を選定した。

表-5.5は、大型車のモデルパラメータの推定結果である。まず、固定効果について、係数の符号を見ると、降水量、降雪量が多い、気温が低い、道路線形、道路環境が厳しいほど速度が低下すると解釈できるため、冬期の速度低下の傾向を適切に捉えていることが分かる。しかし、サグやクレストといった縦断曲線は、速度低下への影響度合いが小さく、符号も適切でないため、冬期では速度低下への影響が通常時より小さくなっていると考えられる。標準化

係数を見ると気温や長時間の降雪が固定効果の中で大きく速度に影響していると確認でき、冬期の悪天候が速度低下を及ぼしていると考えられる。大型車のランダム効果は説明変数の選定の結果、切片と平均降水量、曲率、1時間平均降雪量を設定した場合が最もモデルの当てはまりが良くなった。気温や風速、3時間6時間降雪量等の気象条件と雪堤や側方余裕といった道路環境条件は路面との相関が強く有意にならなかった。また、サグやクレストといった縦断曲線はランダム効果にすると他変数との相関関係は少ないが、有意にならず路面毎での影響度の違いが見られなかった。勾配の変化より路面悪化の影響が大きく、冬期では縦断曲線の影響が出にくいと考えられる。

表-5.6は、大型車の各路面のランダム効果のパラメータの推定結果である。切片は乾燥と湿潤路面で大きな差はないが、積雪路面になると切片が小さくなっており、湿雪路面では路面積雪量が増えると速度が低下している傾向もみられる。しかし、乾雪路面では途中速度が増加しており、凍結路面に関しては速度低下の起きにくい路面となっている。これは、路面データが十分確保できておらず、路面毎で偏りがあることやデータを区間集計したことが原因と考えられる。平均降水量は、湿潤路面で速度が低下すると予想していたが、湿雪や圧雪路面で大きく速度が低下するという結果になった。このことから雨が降ることによる湿雪、圧雪路面の悪化が大型車の速度低下を引き起こす原因になると考えられる。

表-5.5 固定効果のパラメータ推定結果(大型車)

	係数	標準誤差	標準化回帰係数	VIF
切片	78.678	***	0.711	
平均降水量	-0.497	***	0.229	-0.026
最大風速	-0.177	***	0.010	-0.019
勾配変化率	-0.198	***	0.005	-0.075
曲率	-178	***	30.916	0.000
凹のサグ以外	0.250	***	0.021	0.007
凸のクレスト以外	-0.326	***	0.026	-0.005
サグ	0.074	***	0.028	0.001
クレスト	0.408	***	0.040	0.003
1時間降雪量	0.132	***	0.064	0.003
3時間降雪量	-0.053	***	0.011	-0.021
6時間降雪量	-0.163	***	0.006	-0.171
平均気温	0.045	***	0.002	0.101
側方がやや狭い	-0.344	***	0.035	-0.003
側方が狭い	-1.106	***	0.038	-0.017
路肩雪堤が低い	0.078	***	0.024	0.002
路肩雪堤がやや高い	-0.127	***	0.025	-0.004
路肩雪堤が高い	-0.497	***	0.043	-0.004
中央分離帯雪堤が低い	-0.092	***	0.022	-0.003
中央分離帯雪堤がやや高い	-0.301	***	0.026	-0.006
中央分離帯雪堤が高い	-0.547	***	0.039	-0.004

表-5.6 各路面のランダム効果のパラメータ(大型車)

	切片	平均降水量	曲率	1時間降雪量
乾燥	2.791	0.275	2.328	-0.080
濡れ	2.676	0.408	3.833	0.051
水たまり	2.109	0.546	1.088	-0.148
冠水	2.183	0.845	-0.157	0.034
薄雪	1.682	0.651	2.351	-0.253
湿雪1~3cm	0.370	0.256	-4.358	0.231
湿雪3~5cm	-3.413	-0.115	-1.214	0.155
湿雪5~10cm	-1.376	-1.926	-0.357	0.249
湿雪10cm以上	-6.819	0.121	1.124	-0.304
凍結	2.340	0.247	-0.102	0.042
乾雪1~3cm	0.035	0.107	-1.916	-0.062
乾雪3~5cm	-0.111	0.147	-1.455	0.048
乾雪5~10cm	1.684	-1.074	0.926	-0.019
乾雪10cm以上	-1.272	0.161	-1.318	-0.090
圧雪	-2.880	-0.650	-0.772	0.148

曲率は、路面積雪が少ない路面の際に、影響を及ぼすと一見みえるが、曲率の最大値が0.0145と値が小さいため、平面線形の影響は少ないと考える。1時間降雪量は路面毎で偏りはあるが、他の変数と比べると段階的な傾向はみられず、どの路面でも降雪が速度低下に影響していると言える。しかし、一部の路面で係数が大きくなっているため、短時間の降雪は路面以外の変数と相互作用がある可能性も考えられる。

表-5.7は、小型車のモデルパラメータの推定結果である。

切片を見ると、大型車より速度が約10km/hほど高くなっており、小型車のデータが適切に取れていることが分かる。固定効果に関しては係数の符号を見ると、降水量、降雪量が多い、気温が低い、道路線形、道路環境が厳しいほど速度が低下すると解釈できるため、大型車と同様に冬期の速度低下の傾向を適切に捉えており、大型車よりも雪の影響を大きく受けているという結果になった。これは小型車より大型車の方が、制限速度の関係から速度変動が少ないことやドライバーの冬期の高速道路の運転経験の差などが原因として考えられる。しかし、こちらも縦断曲線に関しては速度低下の影響度合いが小さいことが確認できる。

表-5.7 固定効果のパラメータ推定結果(小型車)

	係数	標準誤差	標準化回帰係数	VIF
切片	88.897	***	2.024	
平均降水量	-1.169	***	0.040	1.162
最大風速	-1.064	***	0.381	1.215
勾配変化率	-0.680	***	0.115	1.010
曲率	-1157	***	74.627	1.045
凹のサグ以外	0.700	***	0.049	1.200
凸のクレスト以外	-1.539	***	0.062	1.128
サグ	1.210	***	0.069	1.119
クレスト	0.903	***	0.082	1.085
1時間降雪量	0.571	***	0.036	1.841
3時間降雪量	-0.232	***	0.028	4.449
6時間降雪量	-0.400	***	0.017	3.851
平均気温	0.101	***	0.005	1.472
側方がやや狭い	-2.763	***	0.087	1.106
側方が狭い	-5.431	***	0.104	1.254
路肩雪堤が低い	-0.562	***	0.056	1.894
路肩雪堤がやや高い	-1.938	***	0.062	2.057
路肩雪堤が高い	-2.265	***	0.101	1.357
中央分離帯雪堤が低い	-0.197	***	0.050	1.516
中央分離帯雪堤がやや高い	-1.733	***	0.064	1.474
中央分離帯雪堤が高い	-2.741	***	0.103	1.261

表-5.8 各路面のランダム効果のパラメータ(小型車)

	切片	最大風速	勾配変化率	曲率
乾燥	10.049	0.966	0.166	-2.152
濡れ	9.288	0.341	0.353	-13.646
水たまり	6.700	0.452	-0.198	-0.793
冠水	11.573	-0.207	0.989	-0.375
薄雪	2.548	0.208	-0.303	0.652
湿雪1~3cm	0.734	0.340	0.380	6.147
湿雪3~5cm	-4.798	0.331	0.368	0.465
湿雪5~10cm	-10.110	-1.383	-0.289	1.871
湿雪10cm以上	-9.568	0.324	-0.056	1.298
凍結	6.068	-0.661	-0.320	-0.496
乾雪1~3cm	-4.241	-1.658	-0.107	0.312
乾雪3~5cm	-7.688	0.058	-0.311	5.259
乾雪5~10cm	5.685	0.657	-0.014	-0.314
乾雪10cm以上	-8.349	2.981	-0.468	0.021
圧雪	-7.890	-2.750	-0.189	1.750

標準化回帰係数を見ると、こちらも同様に気温や長時間の降雪が固定効果の中で大きく速度に影響していると確認でき、大型車の傾向と異なる点として勾配変化率の影響が大きく出ている点が挙げられる。これも大型車より小型車の方が、速度変動が大きいことに起因していると考えられる。

表-5.8は、大型車の各路面のランダム効果のパラメータの推定結果である。小型車のランダム効果は説明変数の選定の結果、切片、最大風速、勾配変化率、曲率を設定した場合最もモデルの当てはまりが良くなった。まず、切片について路面の良い時と悪い時で最大約20km/hの速度変動があり、路面が速度低下に大きく影響していることが確認できる。大型車と同様、路面積雪量が増えると段階的に速度が低下している傾向もある。しかし、乾雪路面では途中速度が増加しており、凍結路面に関しては速度低下の起きにくい路面となっており、路面データが十分確保できておらず、路面毎で偏りがあることやデータを区間集計した影響が小型車でも確認できる。最大風速は、冠水や凍結や路面積雪の多い路面で速度低下しており、横風による影響を受けやすい路面で速度低下に影響すると考える。一般的に、横風は小型車よりも大型車の方が影響を受けるが、その影響は路面の影響よりも小さいと結果から考える。勾配変化率は、路面の酷い場合で、上り勾配が厳しいほど速度が低下すると解釈できる。しかし、乾燥や湿潤路面では、下り勾配が厳しいほど速度が低下するという解釈になる。勾配の最大値を見ると2.5%と大きな値ではないため、影響は僅かだと考える。今回勾配は区間集計しており、勾配のどこに車両が位置しているかは考慮していない。対象の勾配をどれだけ走行していたかといった車両の地点から上流部の勾配も考慮することでより適切に勾配の影響を考慮できると予想する。最後に曲率に関しては、湿潤路面の時に曲率が速度低下に与える影響が大きくなる傾向があるが、曲率自体の値が非常に小さいため、その影響は誤差程度だと考える。やはり、小型車も平面線形より冬期の道路条件の影響を大きく受けることが分かる。

6. 車両挙動モデル

車両追従モデルは IDM モデルを用いた。IDM モデルは対象車両と前方車両の走行状態と位置関係から加減速を行うモデルになっている。

$$acc_i(k) = a \left(1 - \left(\frac{v_i(k)}{V} \right)^4 - \left(\frac{s^*(v, \Delta v)}{d_i(k)} \right)^2 \right)$$

$$s^*(v, \Delta v) = s + \max \left(0, v_i(k)T + \frac{v_i(k)(v_{i-1}(k) - v_i(k))}{2\sqrt{ab}} \right)$$

ここで、

- $acc_i(k)$: 時刻 k における車両 i の加速度(m/s²)
- a : 最大加速度(m/s²)
- $v_i(k)$: 自車速度(m/s)
- b : 最大減速度(m/s²)
- $v_{i-1}(k)$: 先行車速度(m/s)
- V : 希望速度(m/s)
- $d_i(k)$: 車間距離(m)
- T : 車頭時間(s)
- $s^*(v, \Delta v)$: $(v, \Delta v)$ における最小車間距離(m)
- s : 停止時車間距離(m)

モデルに使用しているパラメータは車種別で、通常路面時と積雪路面時で異なる値を設定し、雪による車両挙動の影響を再現している。

追い越し挙動は処理対象の車両とその前後を走行する周辺車両との位置関係によって判定する。同じ車線の前方に車両がない場合は自由走行とし、追い越し判定は周辺車両との位置関係から安全に車線変更できると判断された場合、追い越し挙動を行う。車線変更できないと判断された場合は前方車両と同じ速度で追従挙動を行う。対象車両の追い越した後、追い越しから本線に復帰する際は、周辺車両との位置関係から安全に車線変更可能な場合、本線に復帰し、不可能ならばそのまま追い越し車線を走行する。雪による追い越し挙動の減少は路面の悪化で希望走行速度が低下し、追い越し判定の制約が厳しくなることで表現している。右折車線への車線変更も同様の処理で行っている。

シミュレーションに除雪車を走行させることで除雪作業による路面状態の改善と走行速度の回復を再現している。路面を一定区間ごとに設定し、除雪車が区間を走り切ると路面が回復する処理になっている。除雪サイクルは路面状態によって設定できる。

7. 交通シミュレーションを用いた除雪計画の検討手法の提案

作成した交通シミュレーションを用いて、集中豪雪による車両の長期滞留への一つである除雪作業について考える。現状の除雪体制は除雪を実施する明確な基準がなく、人の経験に依存していることが課題である。そこで、本研究で作成した交通シミュレーションを用いることで定量的な除雪計画の検討が可能になる。交通需要、降雪量、除雪頻度を変化させていくつかシミュレーションを行い、路面積雪量を除雪作業の基準として、除雪計画を検討する手法を提案する。シミュレーション結果から除雪作業前と後の除雪車追従の影響を受けていない車両の平均速度を比較して、速度回復による所要時間短縮の便益を算出する。そして、除雪費用と除雪車追従による車両時間増加損失を便益から差し引いて、各条件下における除雪作業の効用を評価する。

$$BT = BT_0 - BT_w \quad (7.1)$$

$$BT_w = BT_{w1} + BT_{w2} \quad (7.2)$$

ここで、

- BT : 除雪作業がもたらす費用対効果(円/h)
- BT₀ : 除雪による総走行時間短縮便益(円/h)
- BT_w : 除雪による総走行時間費用損失(円/h)
- BT_{w1} : 除雪車追従による総走行時間増加損失(円/h)
- BT_{w2} : 除雪作業にかかる費用(円/h)

$$BT_0 = \left(\frac{L}{v_0} - \frac{L}{v} \right) (Q_{small} VOT_{small} + Q_{big} VOT_{big}) \quad (7.3)$$

ここで、

- L : 区間長(km)
- v : 除雪車追従の影響のない車両の平均速度(km/h)
- v₀ : 除雪作業が無い場合の車両平均速度(km/h)
- Q_{small} : 除雪車追従の影響のないリンクを通過した小型車台数(台)
- VOT_{small} : 小型車の時間価値原単位(円/台*h)
- Q_{big} : 除雪車追従の影響のないリンクを通過した大型車台数(台)
- VOT_{big} : 大型車の時間価値原単位(円/台*h)

表-4.1 車種別の時間価値原単位
(国土交通省費用便益分析マニュアル参照¹¹⁾)

	VOT _{small}	VOT _{big}
時間価値原単位(円/台*h)	2,461	4,616

$$BT_{w1} = \left(\frac{L}{v_{j\text{osetsu}}} - \frac{L}{v_0} \right) (Q_{\text{small}} VOT_{\text{small}} + Q'_{\text{big}} VOT_{\text{big}}) \quad (7.4)$$

ここで、

$v_{j\text{osetsu}}$: 除雪車追従の影響を受けた車両の平均速度(km/h)

Q'_{small} : 除雪車追従の影響を受けた小型車台数(台)

Q'_{big} : 除雪車追従の影響を受けた大型車台数(台)

$$BT_{w2} = C_{j\text{osetsu}} Q_{j\text{osetsu}} L \quad (7.5)$$

ここで、

$C_{j\text{osetsu}}$: 1km 当たりの除雪作業費用 4500(/km), 国土交通省 道路事業説明資料から¹²⁾

$Q_{j\text{osetsu}}$: 除雪車台数(台)

このようにして除雪計画を検討できるが、車両速度の観点のみでの比較は不十分である。除雪作業は車両速度の回復だけでなく、交通事故やスタック発生の抑制の役割も兼ねている。そのため、交通事故やスタックの発生確率や被害額を考慮する必要がある。

1. まとめ

本研究では、冬季道路環境条件を考慮したミクロ交通シミュレーションを開発した。その過程で、路面等の冬期道路環境から希望走行速度の推定を行う新たな速度モデルを作成し、冬季では路面や長時間の降雪が速度変動に大きく影響していることが分かった。開発した交通シミュレーションを用いて、除雪計画を定量的に検討する手法を提案した。改善点はあるものの現状人の経験に依存している除雪作業計画の課題に対して解決策を示せた。

今後の課題として、交通シミュレーションに関しては、速度推定モデルの精度向上が挙げられる。使用した道路環境データの精度に問題があったことや視界状況を新たに変数として追加することなど改善が必要である。交通シミュレーションを用いた除雪計画の検討に関しては、実務での活用を見据えて、交通事故やスタック発生確率と被害額など交通障害が社会経済にもたらす影響を考慮する必要がある。また、一般道と国道を一体になって考えられるよう、道路ネットワーク全体での除雪計画を検討できるような手法に改善していく必要がある。

参考文献

- 1) 東日本高速道路株式会社：関越道大雪に伴う大規模車両滞留を踏まえた NEXCO 東日本の雪氷対策の強化・改善策について， URL : https://www.e-nex-co.co.jp/assets/pdf/pressroom/data_room/regular_mtg/r03/0127/01.pdf, 2021.
- 2) 武知洋太,伊東靖彦,加治屋安彦：冬期走行環境の運転への影響と情報ニーズ，第 51 回(平成 19 年度)北海道開発局技術研究発表会，平成 19 年度(ふ-14)，2008.
- 3) 伊藤潤：降積雪地域における冬期交通現象に基づく道路整備評価のあり方に関する研究，2020
- 4) 大島亮：降積雪が信号交差点の交通容量へ及ぼす影響，長岡技術科学大学，2016，修士論文
- 5) Songhua Hu: Modeling Link-level Road Traffic Resilience to Extreme Weather, arXiv:2310.14380, 2023
- 6) Jiancheng Weng: Impact of Weather on Urban Freeway Traffic Flow Characteristics and Facility Capacity, Hindawi Publishing Corporation Discrete Dynamics in Nature and Society, 2013, Article ID 791743, 6 pages
- 7) Ahmed Abohassan: Effects of Inclement Weather Events on Road Surface Conditions and Traffic Safety: An Event-Based Empirical Analysis Framework, Transportation Research Record 2022, Vol. 2676(10) 51-62
- 8) 岡上政史, 奥島政嗣：交通障害発生時に対応した高速道路リアルタイム交通流シミュレーションの基礎的検討，土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol67, No5, (土木計画学研究・論文集第 28 巻), I_1071-I_1078, 2011.
- 9) 宗広一徳, 高橋尚人, 浅野基樹, 中辻隆：冬期追従挙動モデルによる札幌都市圏冬期交通流の再現，北海道開発土木研究所月報, No614 号, 2004.
- 10) 中村一樹, 砂子宗次郎, 上石勲, 宮島亜希子, 中条仁：スマートフォン AI 路面判定システムの開発，雪氷研究大会(2022・札幌), 2022.10.1-10.5.
- 11) 国土交通省道路局都市局：費用便益分析マニュアル，令和 5 年 12 月，最終アクセス 2025.2， URL: https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-hyouka/ben-eki_2.pdf
- 12) 国土交通省 行政事業レビュー公開プロセス説明資料 道路事業(補助・除雪)，令和 4 年，最終アクセス 2025.2， URL: <https://www.mlit.go.jp/page/content/001485958.pdf>