

状態空間モデルを用いた冬季高速道路におけるスタック発生リスクの予測

都市交通研究室
20327687
針原拳太

1 はじめに

近年、我が国においては極端な豪雪を起因とした交通障害が頻発しており、自動車や高速道路を取り巻く環境に対しても、その影響は大きい。具体的な例として、降雪による路面状況や視程の変化は走行性能の低下を引き起こし、それに伴い大型車等がスタックし大規模な車両滞留が発生する事例などが挙げられる。本研究で対象とした関越自動車道においても、2020年の12月から2021年の2月にかけて冬型の気圧配置により、日本海側で記録的な大雪となり、多数のスタックを契機とした交通障害が発生した。こうした問題を背景に、冬季の道路環境でスタックの発生を未然に防ぐ重要性は高まっており、予防的な通行規制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。

上記を踏まえて、スタックの発生リスクを逐次的に把握することができれば、道路管理者が各種の判断を行ううえでの指標となり得て、より効率的な対策の実施につながると考えられる。

2. 関連する既往研究及び本研究の位置づけ

2.1 既往研究

本研究は豪雪時の高速道路環境下におけるスタックの発生を対象とした研究である。本研究を行うに当たり関連する既往研究について、3つ観点から整理したものを以下に示す。

1) スタックの発生メカニズムに関する研究

冬季の道路上においてスタックが発生するメカニズムは既往研究で明らかにされている。藤本ら²⁾は、吹雪による視界不良、堆雪による道路の有効幅員の減少、路面状況の変化等により、各種走行性能が低下して急減速や発進・停車等の挙動が多くなり、路面の摩擦係数が低下し、タイヤの空転が誘発され、スタックに至るということを示している。それを踏まえて本研究では、特定区間

の車両群の平均車速に関して、冬期の環境要因により時系列的に大幅な低下傾向が存在する場合には、スタックの発生リスクが高まるものと定義して、状態空間モデルにより推定される各種パラメータ値から、スタックの発生リスクを把握できる指標について検討する。また単に車速の増減だけに着目するのではなく、各時点の路面状況等も含めて複合的にスタックの発生リスクについて判断できるようなモデル構造を検討する。

2) 道路交通における異常事象の検知に関する研究

Umedaら³⁾は冬季の一般道路におけるスタック発生リスクを逐次的に把握することを目的として、状態空間モデルによるリスクの評価手法を提案している。モデルの構造として、被説明変数は特定区間の85%マイル車速度で、説明変数は降雪量、気温、プローブ搭載車両台数の3変数と、その他に切片成分、周期成分、観測誤差成分から構成されている。信号交差点等の人為的な制御である程度の規則性を持った区間平均車速の時系列変化が降雪の影響により、過去と速度分布と比較し大きく乖離している場合に該当区間はスタックの発生する危険性が高いものと定義している。実際にスタックにより車両滞留が発生した区間において、上記のモデルを適用して、危険度の評価指標はスタックの発生が近づくにつれて危険側を示すことを確認している。またUmedaら⁴⁾は高速道路における過去の豪雪時のスタック及び車両滞留の発生事例に対しても、過去のデータから推定される車速分布とリアルタイムに観測される車速分布の偏差に基づいた評価指標を定義することで提案手法を適用しており、同様の傾向がみられたことを報告している。

このように、スタックの発生リスクの高まりは降雪量と特定区間の平均車速、プローブ通過台数からある程度の推測が可能であることが明らかとなっているが、一般道路と比較して信号交差点等がなく渋滞流が発生しにくい高速道路においては数理的にシンプルな走行車両の車速の変化構造であることから、高速道路を取り巻く冬季の走行環境に影響する要因としては除雪作業による路面状況の回復によるスタックの発生リスクの変化を考慮したモデルを構築することで、より鋭敏にスタックの発生リスクを過去の傾向から把握できると考えられる。また前述に示すように、除雪作業を講じることによるスタッ

クの発生リスクの改善効果を把握するためにも、上記のようなモデル構造により危険指標を導出すれば実務的に活用できると考える。

3) 冬季の環境要因と走行速度の関係に関する研究

Yasanthi ら⁹⁾は冬期悪天候条件下での走行に関してドライバーの行動を調査・集計して、ドライバーの希望速度の変化を推定する回帰モデルを構築している。結果として路肩を走行する車両及び大型車両は中央車線を走行する車両及び一般車両と比較して、各ドライバーの希望速度は降雪の影響を受けやすく、降雪強度が高いほど双方とも希望速度は低下する傾向にあることを明らかにしている。

武知ら⁹⁾は冬期の走行環境が運転へ及ぼす影響について、被験者走行実験により道路線形、運転者の視程、路面状況の3つの影響要因に関して分析を行っている。実験及び分析の結果から、道路線形による影響として、積雪期の平均走行速度は中央分離帯などの道路構造物が区間内に存在しない直線区間と比較して、カーブ区間かつ曲線半径が400m以下の区間でより顕著な減少傾向が確認できたと報告している。次に吹雪視程による影響として、視程が低下するにつれ走行速度は観測箇所に関係なく低下する傾向が確認され、視程200m以下で顕著な低下傾向が確認できたと報告している。最後に路面状況による影響として、乾燥路面と比較して湿潤、シャーベット、圧雪、凍結の冬期の4つの路面で速度低下は確認できたが、調査場所の交通量の少なさや対向車がほとんど存在しない区間であったことから、サンプルデータを増やした検証を実施して、低下傾向を把握する必要があると報告している。

小島⁷⁾は高速道路の冬期路面における車両の走行速度に関して、特定の区間においてWEBカメラによる画像データとトラフィックカウンターのデータを1時間単位で集計及び分析した結果、乾燥路面を基準とした速度低下率は、湿潤路面で95.9%、黒シャーベット路面で77.6%、白シャーベット路面で69.5%、圧雪路面で63.9%という結果が得られたと報告している。また低下傾向は観測区間によらず一様であったが、白シャーベットと圧雪路面に関しては、低下度合いのばらつきが大きくなっていたことを確認している。

このように冬期の環境要因が高速道路環境下の走行車両へ与える研究は多くなされているが、研究手法としては車速と各影響の関係を単回帰的に分析・推定するものが専らであった。それらを踏まえて本研究ではモデル構造は説明変数が少ないシンプルな構造でありつつ、走行

速度は路面状況を含めて道路線形や交通量等の多数の複雑な要因により変化することは明らかであることから、そのような要素にも十分に考慮したスタック発生リスクの指標を導出することができる手法について検討する。

2.3 研究の目的

前節の研究背景・既往研究を踏まえて、本研究ではスタックの発生リスクの高まりを、逐次的に把握することが可能なリスク指標を提案した。リスク指標の構築に当たり、スタックの発生が走行速度の低下に起因していることに着目して、区間平均車速を推定する時系列モデルを構築する。ここで与える影響が大きいと考えられる路面状況や視程レベルに考慮したモデル構造を、単純集計的な分析により検討した。それぞれの分類やレベルは気象データや除雪車の通過履歴等から定量的に分類できるモデルを別途構築して、カメラ等によるモニタリングが行われていない区間でもモデルを適用できる手法も併せて提案する。得られた結果を踏まえて定式化したモデルを、複数の過去のスタック発生事例に適用して、スタックの発生直前には導出される各種のパラメータ値に何らかの異常値が検出されていないか確認する。ここで確認された特徴から、定量的なスタックの発生リスク指標を構築する。また構築したリスク指標に関して、関越自動車道における広域で導出して、スタックが発生していない区間ではどのような値を示しているのかを確認することで、リスク指標としての妥当性を検証する。

3. 区間平均車速に影響する冬季環境要因

既往研究にて整理したように、冬季の高速道路を取り巻く環境要因として、吹雪視程や降雪量、路面状況等によるドライバーへの影響に関する研究は多くなされている。冬季の環境下における自動車の走行速度は、ここで挙げた路面状況や視程以外にも、道路線形や交通流率等の複雑な要因により変化することが明らかである。それらを踏まえて本研究では区間平均車速を推定する状態空間モデルにおいて説明変数の回帰係数を正規分布に従う確率変数として推定を行う。推定に当たり用いる説明変数に関しては、冬季の環境要因として走行速度へ及ぼす影響が比較的高いと考えられる路面状況について、過去のスタック時の走行速度の変化に対して、説明力がどの程度あるのかを集計的に分析することで、モデル構造を検討した。本章では集計フロー及び結果について以下に示す。

3.1 決定木分析を用いた路面状況の分類

冬季の路面状況と走行速度の関係を分析するにあたり、決定木分析による定量的な仮想変数化の手法を用いた。決定木を構築するにあたり目的変数となる路面状況は、関越自動車道上の管理用カメラにて30分毎に記録した画像データから、目視による路面状況の判別を行った結果を用いた。目視での判別のフローは既往研究として田辺ら⁷⁾が示したフローを参考に、冬季の路面状況について路面の水分含有やトレッド跡の有無等から図-1に示すフローから湿潤、黒シャーベット、白シャーベット、圧雪、積雪の5つの大分類に判別した。ここで以下の一部において、黒シャーベット及び白シャーベットは、それぞれ黒シャ、白シャと記載する。本研究で用いた管理用カメラは湯沢IC付近となる165.3KP地点のものを用いた。上記地点を用いた理由としては、該地点は関越自動車道上においても、特に降雪による路面状況の変化が激しく、各路面状況のサンプルが比較的多く取得できる点が挙げられる。データの取得期間及び判別は2022年1月の1か月間の画像データで行い、画像データは目視での判別が可能であった7時20分から16時20分間から取得した。ここで対象区間および期間において、積雪路面は7時点でしか観測されず、これは他の路面状況と比較しても極めて少ないことから、本研究において冬季の路面状況の大分類は湿潤、黒シャーベット、白シャーベット、圧雪の4つと定義し分析を各種行った。各路面状況の参考画像を図-2に示す。

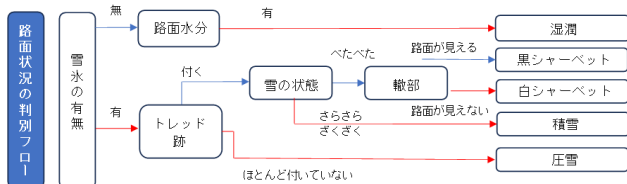


図-1 目視での冬季路面状況の判別フロー

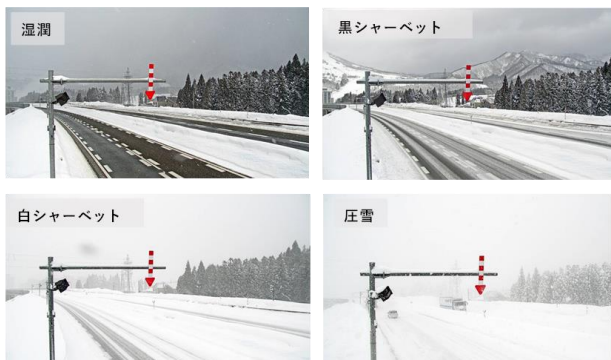


図-2 設定した冬季の各路面状況の参考画像

前述の決定木分析における説明変数として、既往研究⁷⁾にて路面状況と相関が特に高いことが示されていた30分降雪量、気温、30分降雪量と除雪車の経過時間から推計した路面積雪量の3変数を設定した。推定路面積雪量に関しては単に除雪車の経過時点にて累積降雪量を0にリセットする演算を行ったものと定義した。ここで時間は30分単位での集計を行っているが、除雪車の通過時点は1秒単位の時刻を参照し、除雪車が通過してからの経過秒数を1800秒(30分)で除したものに該時間帯の30分降雪量を乗じて、該時間帯の累積積雪量としている。30分降雪量および気温に関しては視程レベルの際と同様に、管理用カメラによる画像取得地点の165.3KPの最寄りインターである湯沢ICで記録されたデータを用いた。

前述のデータについてランダムに80%を抽出し教師データに、残りの20%をテストデータとして、決定木分析により機械学習を行った。構築された決定木を図-3に、テストデータを決定木に従い分類した結果を表-1に示す。ここで積雪路面は教師データのサンプル数が極端に少なかったため、分類しないものとした。表-1より、目視の判別に基づく路面状況を決定木により予測できているかを示す正答率は低くなっていたが、決定木に基づく路面分類は実際の路面状況(目視判別に基づく路面状況)よりも悪い路面状況を推定できているかという点においては、優れていることが確認できた。上記を踏まえて、時系列モデルに用いる変数として路面状況は、決定木の分岐されるフローに基づいて細分類したのものを用いた。ここでそれぞれ細分類される路面状況に対して学習データの推定精度に考慮した、仮想的な変数を表-2に示すように定義した。ここでの変数は大きくなるほど路面状況が悪くなる傾向にあることを意味しており、湿潤路面は走行速度へ与える影響が0という仮定の基で、それぞれの値を各路面状況に対して湿潤路面=0、黒シャーベット路面=1、白シャーベット路面=2、圧雪路面=3と重みづけすることで定量的な仮想変数を決定した。

表-1 テストデータの分類結果

		決定木に基づく路面状況					正答率
		湿潤	黒シャ	白シャ	圧雪	積雪	
目視判別に基づく路面状況	湿潤	200	7	3	0	0	95%
	黒シャ	19	28	4	0	0	55%
	白シャ	1	9	5	5	0	25%
	圧雪	0	1	3	3	0	43%
	積雪	1	0	0	0	0	
実際の路面状況よりも悪い路面状況を推定した確率		90%	78%	80%	100%		

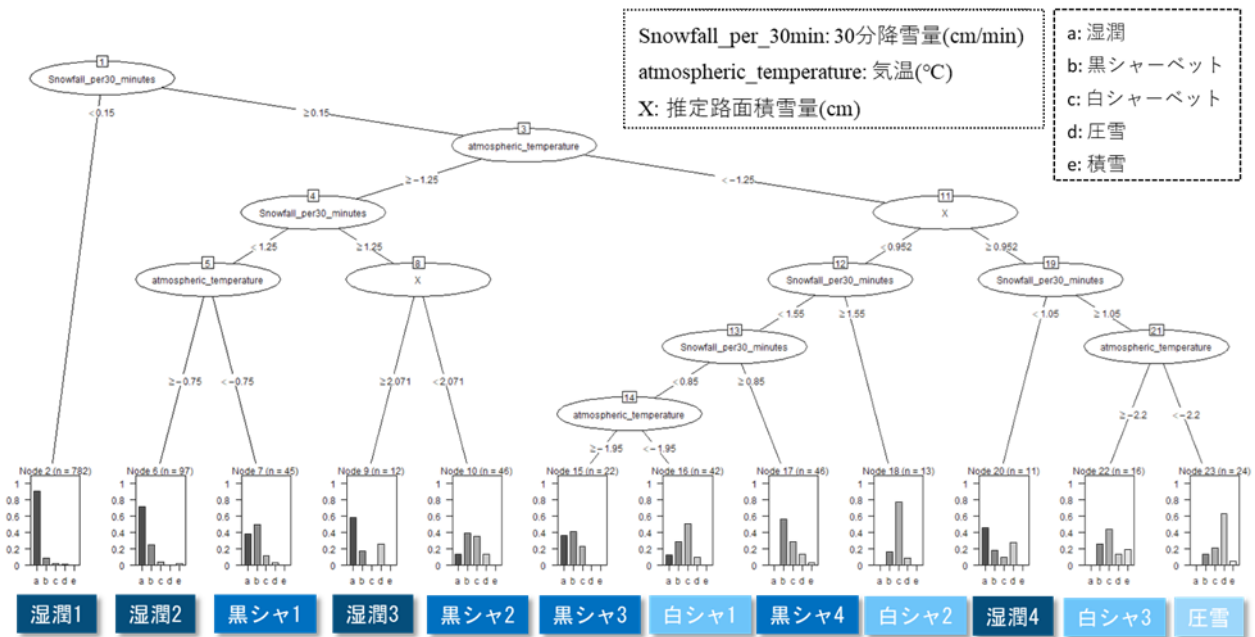


図-3 路面状況分類の決定木

表-2 各路面状況に定義した定量的な仮想変数

	湿潤1	湿潤2	湿潤3	湿潤4	黒シャ1	黒シャ2	黒シャ3	黒シャ4
仮想変数	0.113	0.351	0.917	1.182	0.778	1.478	0.864	1.609
	白シャ1	白シャ2	白シャ3	圧雪				
仮想変数	1.571	1.923	2.250	2.583				

3.2 路面状況と区間平均車速の時系列変化

3.1 にて定義される仮想的な変数と特定区間の平均車速の時系列変化を比較するにあたり、区間平均車速の変化は2020年12月15日に関越自動車道の小出IC付近で発生したスタック発生事例を対象に、当時のETC2.0のプローブデータにて記録される個車の車速の軌跡データから特定区間の平均車速を算出した。併せて、対象区間における路面状況は前述の決定木の分類フローに従い、気温及び降雪量は最寄りインターである小出ICで記録されたデータを用い、除雪車の通過履歴は決定木分析に

おける学習データおよびテストデータと同様に東日本高速道路株式会社より提供いただいた除雪車のGPSログおよびダイアグラムデータを参照し、各時間帯の路面状況の仮想変数を導出した。区間平均車速及び路面状況の仮想変数の時系列変化をそれぞれ導出した結果について図-4に示す。

図-4より区間平均車速はスタックの発生が近づくにつれて低下する傾向が12時間以上前から確認することができ、同様に路面状況に関しても区間平均車速の低下時には湿潤4や黒シャ2等の路面状況の出現数が増加していることが確認できた。

ここでモデルを構成する説明変数は、除雪車の通過履歴が考慮され政策変数となり得る点や鋭敏に区間平均車速に作用していると考えられる路面状況仮想変数を用いた1つの説明変数型のモデル構造とした。ここでモデルの構造上、区間平均車速に影響する要素は路面状況のみというような解釈になるが、前述にも示したように状態空間モデルにより回帰係数のばらつきを考慮することで、シンプルな構造かつ視程の影響やその他にも交通量等の

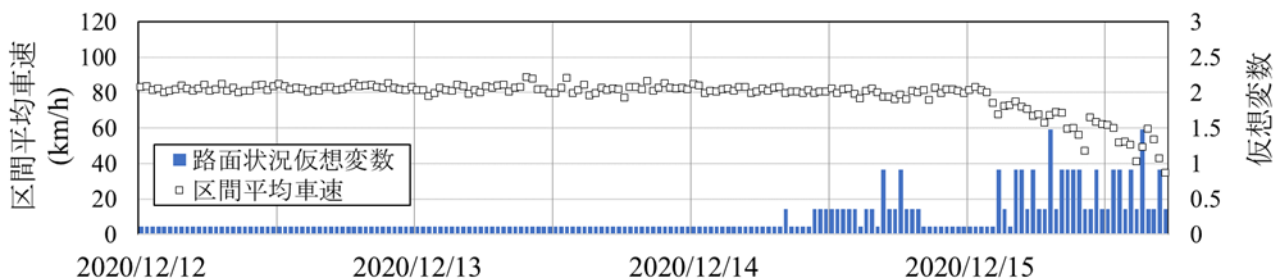


図-4 区間平均車速と路面状況(仮想変数)の時系列変化

影響を反映した路面状況の回帰係数が得られる。また本研究で対象としたスタック事例の発生直前には渋滞流となるような交通流が観測されなかったことから、本研究においては交通流による区間平均車速への影響はほとんどなく、路面状況のみのモデル構造で区間平均車速に対して十分な説明力を保有していると考えられる。モデル構造の詳細は次章にて示すが、大枠としては目的変数に区間平均車速、説明変数に路面状況仮想変数及びそれに対する回帰成分、その他の構成要素として切片成分、観測誤差から構成されるものとした。

4. 区間平均車速推定モデルの構築

提案手法を定式化するに当たり、目的変数(観測値)にETC2.0から取得される小型車を除いた車両群の区間平均車速を設定し、それを構成する要素として、路面状況に係る仮想変数の回帰成分項とレベル成分および観測誤差成分の3つを設定した。構築した線形ガウス状態空間モデルの構造を式(1)、式(2)に示す。式(1)より、レベル成分 α はトレンド等の傾向がない固定値として、観測誤差と路面状況による回帰成分から、区間平均車速の観測値の変化が完全に推定できるように設定している。式(2)にて路面状況仮想変数の回帰係数の発生する分布を定義しており、路面状況の変化に合わせて回帰係数も変化し、実際に観測された区間平均車速に沿った状態値が推定されるようになっている。

観測方程式：

$$y(t) = \alpha + x_{rs}(t) \cdot \beta_{rs}(t) + \varepsilon(t) \quad (1)$$

$y(t)$ ：時間 t における区間平均車速

α ：レベル成分

$x_{rs}(t)$ ：時間 t における路面状況仮想変数

$\beta_{rs}(t)$ ：時間 t における $x_{rs}(t)$ の回帰係数

$\varepsilon(t)$ ：観測誤差 [$\varepsilon(t) \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$]

状態方程式：

$$\beta_{rs}(t) = \beta_{rs}(t-1) + \eta(t) \quad (2)$$

$\eta(t)$ ：過程誤差 [$\eta(t) \sim N(0, \sigma_\eta^2)$]

上記の式(1)、(2)を踏まえて、過去のスタックの発生時のデータを用いてモデルを適用して、スタックの発生直前には路面状況仮想変数の回帰係数が異常値を示して

いるのではないかという仮定の下、状態方程式に示す過程誤差に着目して分析を行う。

5. 過去のスタック発生事例にモデルを適用

5.1 対象としたスタックの発生事例の概要

本研究では、前章にて提案したモデルの妥当性等を検討するに当たり、2020年12月に関越自動車道上で発生した5件のスタックの発生事例に対して、発生2週間程度前から発生直前までを対象として、区間平均車速推定モデルを適用した。対象としたスタックの発生事例の概要を図-5に示す。ここで対象とした事例は、可能な限り他のスタックにより連鎖的に発生していないと考えられる事例が望ましいことから、方向別、時系列的に考慮した事例を選定した。

5.2 モデルの適用結果

前述の発生事例に研究手法を適用し区間平均車速を推定した結果として、紙幅の関係上、事例1の結果のみ図-6に示す。点でプロットしているものは、観測された区間平均車速を示し、黒のラインは区間平均車速を推定した結果を示している。また路面状況仮想変数の回帰係数及び各時点の路面状況仮想変数を図-7に示す。各事例における観測誤差及び過程誤差は表-5に示すようになった。



図-5 対象としたスタックの発生位置及び概要

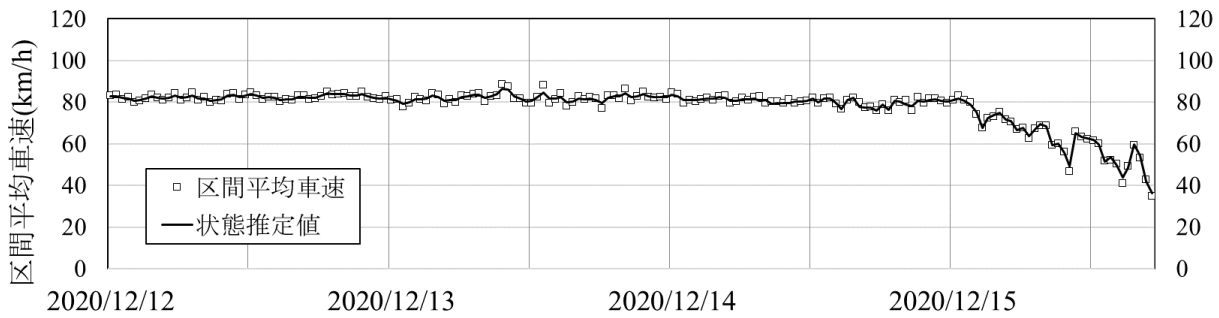


図-6 事例1における区間平均车速の推定結果

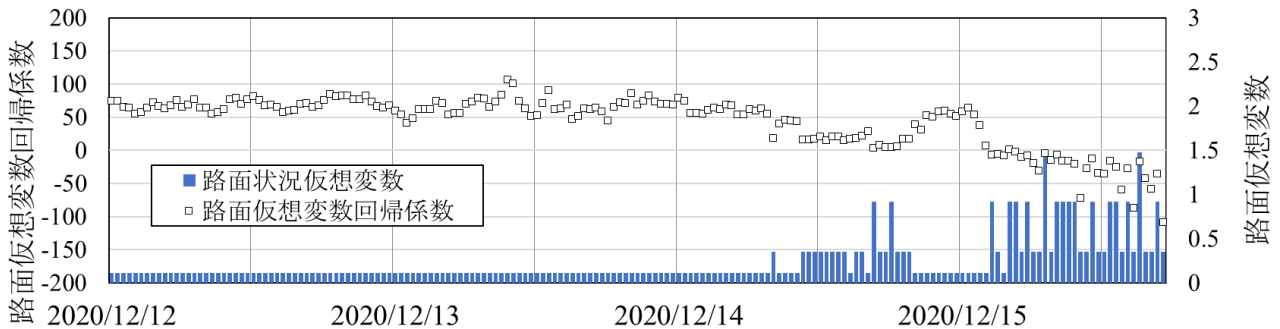


図-7 事例1における路面仮想変数及び回帰係数の時系列変化

ここで発生事例1における対象区間はスタックの発生地点を含む同一方向のデジタル道路ベースにて定められるノードを用いた。ノード長は4.002(km)である。区間平均车速の観測値は上記のノードに含まれるETC2.0で取得される小型車を除いた車両軌跡から算出した。また路面状況を仮想変数に置き換えるに当たり必要な、30分降雪量および気温はスタック発生地点の最寄りインターとなる小出ICにて記録されたデータを用いた。除雪車の通過履歴は前節と同様に全事例で共通して除雪車のGPSログおよびダイアグラムデータを参照した。

5.3 得られたパラメータに対する考察

各スタック発生事例にモデルを適用した結果として、すべての事例に共通して、スタックの発生に近づくにつれて観測値として区間平均车速は低減する傾向があることが確認でき、構築したモデルによる推定結果も同様の結果が得られていた。また低減する傾向は湿潤1路面以外の出現に合わせて確認することができる。低減量は各事例で異なっており、事例1ではスタックの発生直前には30(km/h)近くまで低減していることが図-6より確認でき、一方で事例3ではスタックの発生直前であっても60(km/h)近くまでしか低減していないことが確認できた。ここで各事例において、そのような差異が生じた要因として、区間平均车速の観測値が大幅に低下してスタック

に至った事例(事例1, 事例5)は、区間平均车速の観測値が大幅に低下せずにスタックに至った事例(事例2, 事例3, 事例4)と比較して、路面状況仮想変数が小さな値となっていることが確認でき、そのような場合は、冬季の路面状況として比較的悪化していないことを示していることから、逆は路面状況が悪化していることを示しており、各路面状況でスタックに至る区間平均车速の閾値が異なっていると考えられる。ここで区間平均车速の観測値が大幅に低下せずにスタックに至った事例に関しては、極端な降雪による急激な路面状況の悪化により発生した事例であると考えられる。このことは図-5に示すスタックの発生時刻および終了時刻間の長さが、事例1や事例5と比較しても長いことから、現況の除雪作業による復旧等が難しい状況であったと推測できる。これらの事例に関しては除雪体制の改善であったり、除雪作業のさらなる効率化を図ったりする必要があった事例であると考えられる。しかし事例1, 事例5は推定された路面状況が比較的悪化していないにも関わらず区間平均车速の観測値が大幅に低下してスタックに至った事例であることから、モデルの説明変数として考慮できていない何らかの異常事象の発生による影響が大きく、それにより走行性能の大幅な低下が引き起こされていると考えられる。またこのことは路面状況仮想変数の回帰係数からも確認することができる。路面状況仮想変数に対応する回帰係数は本各路面状況で一定の値近くで推定されるように設

定しており、図-7 においてもスタックの発生直前を除けば、路面状況仮想変数の変化に合わせて回帰係数も段々と変化するように推定されていることが確認できる。しかし、スタックの発生直前には路面状況仮想変数の回帰係数が極端に負に発散した値が出現している。また表-3 に各事例における、出現した路面状況毎の回帰項の平均値と標準偏差を算出した結果を示す。

表-3 において、回帰項の平均値は各事例の発生地点における道路線形等の特徴やモデルの対象区間長による獲得サンプル数の差異による影響で異なる値が得られており、これは各対象区間において各路面状況が車速に与える平均的な影響量を示している。レベル成分の差による細かな差異はあるものの、前述に示した観測誤差や過程誤差に大きな差がなかったことからパラメータとしては全体で妥当な値が得られていると考える。ここで回帰項の標準偏差に着目すれば、事例3における白シャベット3等の観測サンプル数が少ない路面状況では大きな値となっているが概ね10未満の値が得られていることが確認できる。しかし事例1や事例5では比較的サンプル数が多く獲得できる、湿潤2などでも大きな値が得られていることが確認できる。これらの路面状況は事例1や事例5のスタックの発生直前に多く出現していた路面状況であり、このことから何らかの異常事象の発生によりスタックの発生しやすい状況が生み出されていたと考えられる。上記を踏まえて、スタックの発生リスクに関する指標として、各路面状況における過程誤差(路面状況仮想変数における回帰係数の標準偏差)に着目することは有効であることが確認できた。

6. スタックの発生リスク指標の構築及び検証

前章での結果から、図-5 に示した事例において事例1および事例5はスタックの発生直前には定義したモデルにおける路面状況仮想変数の回帰係数が路面状況の変化によらず負に極端に発散した値が多く散見されたことから、モデルの説明変数として考慮できていない何らかの異常事象の発生により、対象区間で走行性能の大幅な低下が引き起こされてスタックの発生に至っていると考察した。ここで前章においてはスタックが実際に発生していた地点を含む区間を対象としてモデルを適用したが、スタックが発生していない地点では該当のパラメータはどのような値を示しているのかを本章で検証を行った。

6.1 モデルの適用における各諸条件

図-8 に示すように関越自動車道の越後川口 IC から湯沢 IC までを44区間に分割して、それぞれの区間における路面状況仮想変数の回帰係数を導出した。ここで分割区間は土地利用における3次メッシュにて囲まれるようにして設定して、メッシュにて囲まれる道路延長が極端に短い区間に関しては隣接する3次メッシュと合わせた区間とした。

スタックが発生していた区間に関しては⑭に該当し、図-5 にて示した事例1と同一の事例を対象としている。モデルの適用期間はスタックが発生する直前となる12月15日の17時までを対象として、前章と同様に30分あたりの目的変数及び説明変数を設定している。

表-3 各路面状況下における回帰成分のパラメータ量

事例1	湿潤1	湿潤2	湿潤3	湿潤4	黒シャ2	黒シャ2	黒シャ3	黒シャ4	白シャ2	白シャ3
回帰項平均値	7.68	-4.28	-11.54		-16.75					
回帰項標準偏差	1.27	12.77	10.67		13.03					
事例2	湿潤1	湿潤2	湿潤3	湿潤4	黒シャ2	黒シャ2	黒シャ3	黒シャ4	白シャ2	白シャ3
回帰項平均値	3.97	-1.76	-6.94		-17.21					
回帰項標準偏差	0.83	2.92	6.80		7.47					
事例3	湿潤1	湿潤2	湿潤3	湿潤4	黒シャ1	黒シャ2	黒シャ3	黒シャ4	白シャ2	白シャ3
回帰項平均値	7.34	-2.73	-13.79		-2.51	-7.65	-22.62		-13.73	-16.64
回帰項標準偏差	1.71	5.10	5.59		5.77	7.02	17.22		2.14	7.94
事例4	湿潤1	湿潤2	湿潤3	湿潤4	黒シャ1	黒シャ2	黒シャ3	黒シャ4	白シャ2	白シャ3
回帰項平均値	17.54	3.96	-8.75	-16.51	-0.28	-9.18	-14.00	-25.31	-15.57	-21.15
回帰項標準偏差	2.44	5.44	7.51	0.30	9.88	11.75	7.81	6.95	9.82	9.84
事例5	湿潤1	湿潤2	湿潤3	湿潤4	黒シャ1	黒シャ2	黒シャ3	黒シャ4	白シャ2	白シャ3
回帰項平均値	16.61	-0.96	-4.27		-12.68	-10.90				
回帰項標準偏差	3.24	16.12	9.67		6.94	9.35				

ここで④の区間に関して、区間の大部分が石打トンネルに覆われているため、ETC2.0の取得サンプル数が極端に少なくなっていたため、適用の対象外とした。説明変数となる路面状況仮想変数は、置き換えるに当たり必要な、30分降雪量および気温はそれぞれの区間の最寄りのインターから取得したデータを用いている。除雪車の通過履歴に関しては前章と同様に除雪車のGPSログおよびダイアグラムデータを参照して、各区間における完全に通過した時刻を導出している。ここでモデルの適用結果として得られる路面状況仮想変数における回帰係数の過程誤差(分散)を比較して、スタックの危険性について考察することから、各区間で異なる観測誤差が推定されると比較ができない。そこで本研究では区間平均車速の観測誤差は、区間によって変化しないものと仮定して、一定の値を設定した。ここでこの値はスタックが発生していた地点を含む⑭においてモデルを適用した結果、得られた値(観測誤差⑭=2.56)を他の区間でも設定した。

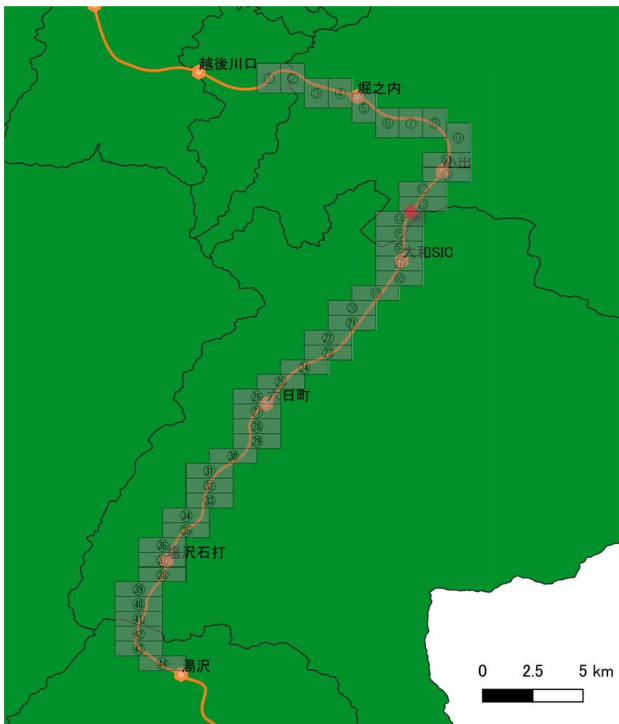


図-8 設定したモデルの各対象区間

6.1 定量的なスタック発生リスク指標の構築

前章にて示したように、スタックが発生していた区間においてモデルを適用した場合、スタックの発生直前に出現数が増加していた路面状況に対する回帰係数の標準

偏差が大きくなっていることが確認でき、その要因として回帰係数が負に大きく発散した値がスタックの発生直前には推定されるためであることが確認できた。上記を踏まえて、区間ごとにモデルを適用して得られた回帰係数から、区間ごとに各路面状況の回帰係数の平均値及び因数から推定される標準偏差を導出する。導出した標準偏差に関して、全区間での平均値を算出し、得られた値を総じて対象とした関越自動車道における各路面状況の回帰係数の出現するばらつきとして定義する。ここで回帰係数の平均値は区間の路線形等の特徴により、それぞれの区間で一定の値にはならない。これは対象とした区間は一律80(km/h)の制限速度であるものの、推定される切片成分が区間によって異なることから確認できる。それを踏まえて、各路面状況における回帰係数のばらつきにのみ着目したスタックの発生リスク指標(SRI: Stuck Risk Indicator)を構築する。スタックの発生リスク指標の導出を定式化したものを式(3)に示す。上記の式は、特定区間にて、ある時点における推定された回帰係数から当該時点の路面状況における回帰係数の区間平均値を差分した値に対して、平均値が0で標準偏差が当該時点の路面状況に対する回帰係数の標準偏差の全区間平均値に従う正規分布における累積確率をスタックの発生リスク指標と定義している。ここでスタックの発生リスク指標は小さいほど回帰係数が負に大きく乖離していることを示し、異常事象によるスタックの発生リスクが高いことを示している。またスタックの発生リスクは0.5に近いほど、異常事象が発生していないもしくは異常事象による走行性能への影響が極めて小さいことを示している。この状態を本研究では、対象とした事例1のようなスタックの発生メカニズムを持つスタックが発生する恐れは極めて少ない安全な状態と定義している。またスタックの発生リスク指標が0.5を超える場合は、事象の本質的には路面状況による走行性能への影響が小さくなっていることを示し、何らかの事象により区間平均車速の観測値が高くなっていることが考えられ、具体的には推定された路面状況よりも実際の路面状況は悪化していない等が考えられる。そのような状態に関しても、本研究ではスタックが発生し難い安全な状況であると定義している。ここで式(3)におけるスタック発生リスク指標は路面状況毎に構築されるものであり、特定の時点において推定された路面状況に対応する正規分布から、スタック発生リスク指標を導出している。

スタック発生リスク指標(Stuck Risk Indicator) :

$$SRI(t) = P(X \leq \beta_{rs}(t) - \overline{\beta_{rs}}) \quad (3)$$

$$X \sim N(0, \overline{\sigma_{rs}^2})$$

$x_{rs}(t)$: 時間 t における路面状況仮想変数

$\beta_{rs}(t)$: t における $x_{rs}(t)$ の回帰係数

$\overline{\beta_{rs}}$: 特定の路面状況に対応する推定回帰係数の対象
区間における平均値

$\overline{\sigma_{rs}}$: 特定の路面状況に対応する推定回帰係数の標準
偏差の全区間平均値

6.2 リスク指標の導出結果

得られた各区間のパラメータ量からスタック発生リスク指標 SRI を導出した結果を図-9 に示す。ここで図-9 は 0 を赤色に、0.5 以上を青色に、2つの中間値を黄色に設定している3色スケールである。図-9 より、スタックの発生リスク指標は降雪が確認される12月14日以前にも小さな値を示す時点が確認できる。この特徴は全区間において共通して確認することができ、これは前述に示したように湿潤1においては、走行性能へ大きな影響を及ぼす異常事象が発生し難いことから、式(3)に示す $\overline{\sigma_{rs}}$ が小さな値となることにより、交通流等の微細な車速の低減に対しても SRI が危険側に導出されている。

ここで図-3のような推定条件の湿潤1状況下において、スタックの発生する可能性自体は極めて低いと考えられることから湿潤1が推定された時点の SRI を一律で 0.5 と設定した場合の導出結果を図-10 に示す。図-10 より、SRI はスタックが発生していた区間⑭を含み、その周辺で危険側を示していることが確認できる。また車速の減少傾向にて大きな差がなかった⑭周辺区間において SRI はいくつかの時点で高い値を示しているものの断続的であることが確認できる。このことからスタックが発生していた区間およびその周辺の広域ではあるものの、SRI によりスタックの発生リスクが高まっている区間を検知できていることが確認できた。また SRI が危険側を示していた区間においてはスタックが発生していた約4時間前から継続的に危険な状態が続いていたことが確認できる。実際にそのような状況が続いていた六日町 IC から小出 IC では、15日の14時19分以降に除雪作業も行われていなかったことから、道路管理者が異常事象の発生を検知することが難しく、危険な状態が続きスタックに至ったのではないかと考えられる。

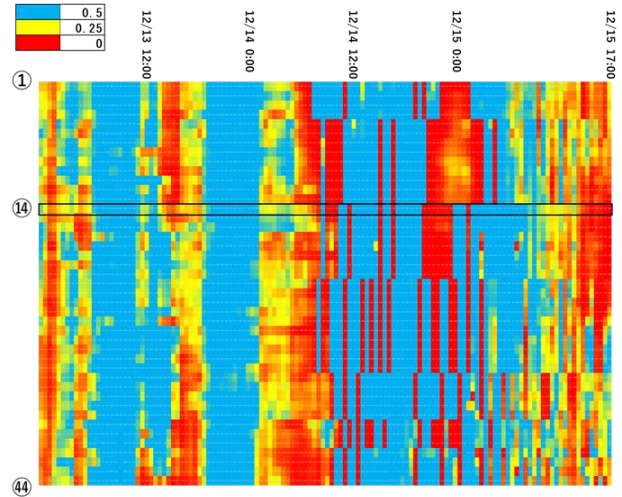


図-9 各区間におけるスタック発生リスクの導出結果

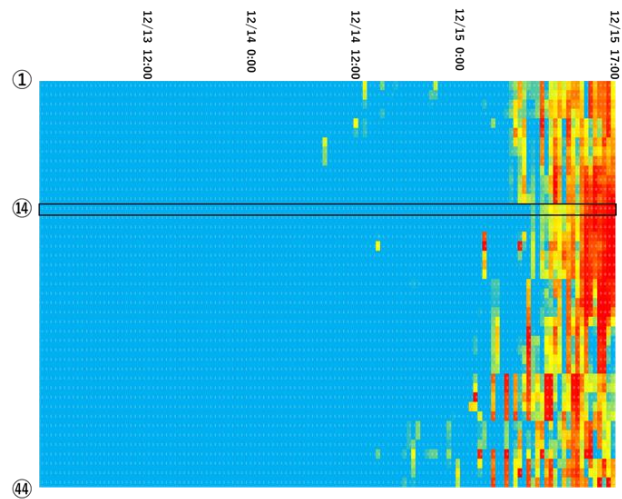


図-10 各区間におけるスタック発生リスクの導出結果
(rs=湿潤1の場合 SRI=0.5 と設定)

また先に湿潤1状況下においてスタックの発生する可能性は低いと示したが、湿潤1においても異常事象による走行性能の低下は検知していることが導出結果より確認できる。図-9にて降雪が確認される以前にも SRI は危険側を示していると前述したが、降雪が観測されはじめて以降に急激かつ極端に危険側に SRI が導出されている時間帯を確認できる。上記の時間帯における乖離の特徴も、以前のものと異なっていることが確認でき、これは降雪の初期で強度も低かったことから湿潤1に推定されたが、視程の悪化等による走行性能の低下が引き起こされていたと考えられる。そのような場合においてはスタックの発生に起因する異常事象が発生した状態であるため、スタックの発生リスクが高い状況が急激に出現する可能性があることも留意しなければならない。

7. まとめ

本研究ではスタックの発生リスク指標 SRI を構築して、関越自動車道上で過去に発生したスタック発生時のデータを用いた検証を行った。結果としては実際にスタックが発生していた区間周辺で発生の数時間前から SRI は危険側を示していることが確認できた。しかし本研究が残している課題もいくつか存在する。それらの課題について以下に示す。

■ スタック発生リスクを検知した後の対策について

本研究で構築したスタックの発生リスク指標 SRI は、モデルにおいて考慮できていない異常事象による道路の走行性能の低下が発生した際に、スタックの発生リスクが高くなることを示す値である。そこで本研究においては、異常事象の特定までは至っていないため、SRI によりリスクの高まりを早期に検知することは可能であっても、必要な対策を検討する上ではその他のデータ等を参照しなければならない。それらの影響を定量的に評価するためには、本研究で示したモデルにおいて説明変数に新たな要素を加えてパラメータを導出する必要がある。上記のような知見を得ることができれば、スタックの発生リスクの高まりの早期検知と併せて、より迅速な道路管理者が講じる対策の体制構築に貢献することができる。と考える。

■ 路面状況の定量化手法および推定精度に関して

本研究では路面状況を定量的な仮想変数に置き換えるに当たり、決定木分析により構築される決定木を活用した。ここでモデルの変数として時間の分解能を 30 分単位に設定したことから、路面状況も 30 分単位の推定を行った。その結果として、路面状況の分類は除雪車の作業状況よりも、30 分降雪量の大小に大きく依存するような条件分岐が得られた。これにより、除雪作業によりスタックの発生リスクの低減を確認することができる状況が少数かつ限定的になってしまっている。除雪作業によってもたらされる、道路における走行性能の回復効果やスタック発生リスクの低減効果に関して、より詳細に知見を得るためには、時間の分解能を細かくして、除雪作業による路面状況の変化をより鋭敏に推定されるように設定する必要があると考える。そのような時間の分解能の調整等を行うことで、モデルとして得られる各パラメータの有用性が高まると考える。

■ 潜在的なスタック発生リスクの高まりに関して

スタックという事象は発生及び観測がされていないも

の、潜在的に発生リスクが高まっている箇所は多く存在していると考えられる。それらに対して本研究で定義したリスク指標が適切に機能し、リスクの高まりを検知することができているのか別途検証を行う必要がある。そこで既往研究や先進的な取り組みとして現在進められている商用車のデジタコプローブデータやコネクティッドカーデータ等を活用して分析される、スタック発生時やその直前における危険な車両挙動に関する知見¹⁾から、潜在的なリスクの高まりを知ることができる。そのようなデータを活用して、本研究で構築したモデル及びリスク指標の妥当性に関する検証を行う必要があると考える。

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-nexco.co.jp/assets/pdf/pressroom/data_room/regular_mtg/r03/0127/01.pdf, 2021.
- 2) 藤本明宏,河島克久,渡部俊,村田晴彦：大雪時のスタック車両発生メカニズムの解明, 日本雪氷学会誌 雪氷 83 巻 5 号 (2021 年 9 月), 507-522, 2021.
- 3) Umeda, S., Kawasaki, Y., Kuwahara, M. and Iihoshi, A. : Risk evaluation of traffic standstills on winter roads using a state space model, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 125, 2021, 103005, 2021.
- 4) Umeda, S., Kawasaki, Y., Kuwahara, M. and Iihoshi, A. : Construction of road anomaly event detection method for occurrences of disasters via state-space model that utilizes weather and probe data, Transportation Systems in the Connected Era - Proceedings of the 23rd International Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies, HKSTS 2018, 486-496, 2018.
- 5) Yanthi Rillagoda, G.N., Mehran, B. : Modeling free-flow speed variations under adverse road-weather conditions: Case of cold region highways, Case of cold region highways, Case Studies on Transport Policy, Volume 8, Issue 1, 2020, Pages 22-30, 2020.
- 6) 武知洋太,伊東靖彦,加治屋安彦：冬季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.
- 7) 小島崇幸：高速道路の冬季路面における走行速度の検討, 雪氷研究大会講演要旨集, B5-2, 2015.