冬期の路面状況および視程障害を考慮したスタック発生リスクの予測モデルの構築

針原　拳太[1]・佐野　可寸志[2]・加藤　哲平[3]・原山　哲郎[4]

[1]非会員　長岡技術科学大学大学院 環境社会基盤工学分野（〒940-2188　新潟県長岡市上富岡町 1603-1）
E-mail: s203276@stn.nagaokaut.ac.jp

[2]正会員　長岡技術科学大学 環境社会基盤系 教授（〒940-2188　新潟県長岡市上富岡町 1603-1）
E-mail: sano@vos.nagaokaut.ac.jp

[3]正会員　長岡技術科学大学 環境社会基盤系 講師（〒940-2188　新潟県長岡市上富岡町 1603-1）
E-mail: tkato@vos.nagaokaut.ac.jp

[4]正会員 長岡技術科学大学大学院 工学研究科（〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1）
E-mail: s237007@stn.nagaokaut.ac.jp

冬期の高速道路において，路面状況の変化や視程の低下は走行性能の低下を引き起こす．走行性能の低下に伴い，区間内の車両群の平均車速は低下し，車両のスタックが誘発される．こうして誘発されるスタックは大規模な車両滞留等をもたらす可能性があり，未然に防止する施策が求められる．

本研究ではスタックの発生リスクを特定区間内の平均車速の低下と定義して，路面状況を基本として，視程，交通量等の要因にも考慮して，区間平均車速の時系列変化を予測できるモデルを構築する．ここで路面状況及び視程のレベルは気象データ等から推定できる手法を検討し，CCTV カメラ等で直接監視していない地点でも適用できるモデルとした．また構築したモデルをスタックが発生した実事例に適用し，スタック発生リスクの変化を導出することができているか検証した．

Key Words: *heavy snowfall, stucking hazard, road surface conditiont, visibility, segment average speed*

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．本研究で対象とする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．そのような問題を背景に，冬期の高速道路においてスタックの発生を未然に防ぐ重要性は高まっており，予防的な通行規制及び集中除雪や，迂回を促す情報提供等の予防的な施策が各所で講じられている．

上記のような対策を講じるうえで，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．そこで本研究ではスタックの発生過程において，走行速度の低下がポイントとなっていることに着目して，高速道路上の特定の区間を走行する車両群の平均速度に関して，スタックの発生直前には，どのような異常値が検出されるのかを，過去のスタック発生時のデータと時系列モデルによる分析を活用することで把握を試みる．また除雪等の対策を講じた場合にスタックの発生リスクはどの程度，低減するのか等を把握することができるようなモデルの構築を目的として，実務的に柔軟に活用できる危険指標の導出手法を提案する．

2. 関連する既往研究及び本研究の位置づけ

本研究を行うにあたり，関連する既往研究を以下に整理する．

(1) 冬期道路環境における異常事象検知に関する研究

Umeda ら[1]は冬期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%タイル速度で，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車速の時系列変化が降雪の影響により，過去の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立往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[2]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事例に対して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．

(2) 冬期道路環境が自動車に与える影響に関する研究

Yasanthi ら[3]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[4]は冬期走行環境がドライバーの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，運転者の視程等の影響要因に関して降雪強度別に分析している．結果については，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，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．吹雪視程による影響として，視程が低下するにつれて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．

小島[5]は高速道路における冬期路面に関して，特定の区間において WEB カメラによる道路状況を確認できる画像データとトラフィックカウンター(1 時間単位)のデータを集計及び分析している．その結果として，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%まで低下していることを確認している．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も確認している．

(3) 本研究の新規性及び位置づけ

既往研究を踏まえて，本研究の位置づけ及び新規性は以下の点にあると考える．

- 冬期の高速道路において発生が危惧されるスタックに関して，発生が危惧される地点を走行する車両群の区間平均車速に着目して，時系列モデルを構築する．過去のスタック発生事例を基に，発生の直前には各種異常値が検出されていないかを確認して，発生リスクの逐次的な把握ができる指標について検討及び提案を行う．またモデルを構築するにあたり，構成するパラメーターは過去に確認された事象に基づくデータから精査して，実務的に対策を講じるうえで活用できる判断指標となり得るモデル構造を検討するという点で新規性及び有用性があると考える．
- 本研究では時系列モデルとして線形ガウス状態空間モデルを用いて，過去の事象を基にした各種異常値の検出を行った．具体的には各種回帰係数の過程誤差に着目して，スタック直前には過程誤差が大幅に負の方向(走行性能として悪化する方向)に更新して算出されているのではないかという仮定のもとに，モデルを過去のスタックの発生時のデータからモデルの妥当性を確認した．また構築するモデルは単純に逐次的なスタックの発生リスクを把握するだけでなく，具体的に路面状況が除雪により改善した場合には，どの程度発生リスクが低減されるのか等も導出できる．上記のような一定の予測性を持ったモデルを構築することが可能であるという点で新規性があると考える．
- 本研究では，モデルの被説明変数に特定区間の平均車速，説明変数に路面状況及び視程レベルの影響を考慮した時系列モデルを検討する．そこで路面状況と視程に関しては，道路上の管理用カメラのデータを基に，それぞれの分類やレベルを気象データや除雪車の通過履歴等から，定量的に定義及び推定できるモデルを別途構築する．上記の推定モデルにより，カメラ等によるモニタリングが行われていない地点や路面の積雪量が直接計測されていない地点においても，路面状況や視程レベルを把握することができ，スタックの発生リスクに関しても同時に把握することができるモデルを構築することを本研究における目的とする．

3. 研究の全体像

(1) スタックの発生リスクに関する指標

冬期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 [9]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，スタックの発生リスクが高まっているものと定義して，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) 視程及び路面状況による区間平均車速への影響量

既往研究として整理したように，冬期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．それらの多くは走行速度との関係を単回帰的に分析しているものが専らである．しかし，冬期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．また用いる説明変数に関しては冬期の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，視程のレベルと路面状況について，過去のスタック時の走行速度の変化に対して，説明力がそれぞれどの程度あるのかを集計的に確認して，説明変数を選定した．それぞれ集計のフロー及び結果について以下に示す．

a) 視程レベルを決定木分析により定量的に分類

視程レベルと走行速度の関係を分析するにあたり，前述に示すように最寄り観測点から取得される各種気象データから特定区間の視程レベルを推定・分類して，該当区間のプローブデータにて記録される車速のデータを時系列的に紐づけて集計及び分析を行った．視程レベルの推定モデルには決定木分析により構築される決定木を用いる．決定木分析を行うにあたり，目的変数に関越自動車道上に設置されている管理用カメラの過去画像データから目視により視程レベルを判別した結果を設定し，説明変数に同時点の平均気温，時間当たり降雪量，平均風速，最大風速を設定した．目的変数の視程レベルに関しては**図-1** に示す判別基準に従い，2022 年 12 月 16 日~2023 年 1 月 15 日の関越自動車道上 206KP 付近に設置されているカメラによる画像データから，10 分毎に 4 つの視程レベルに分類を行った．ここでのサンプルは目視での判別が可能であった，7 時 20 分から 16 時 20 分までとした．得られた各視程レベルの出現数を**表-1** に示す．気象データに関して気温及び降雪量は関越自動車道上 206KP の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，平均風速，最大風速は気象庁の小出観測拠点で記録されたデータを用いた．上記の目的変数と説明変数を時系列的に紐づけて，それらのうちランダムな 80%を教師データ，残りをテストデータとして決定木分析を行った結果について，テストデータの推定結果及び正答率を**表-2** に，構築された決定木の概略を**図-2** に示す．**表-2** より特定の視程に対するピンポイントな正答率は高くないが，実際の視程レベルよりも悪い視程レベルを指定した確率は比較的高い値が得られた．また**図-2** より，降雪量が 0.15(cm/10min)未満かつ気温が 3.85~1.15(℃)の場合には風速が大きいほど視程が低下する傾向にあることや，気温が 0.9℃を下回る場合や降雪量が 0.15(cm/10min)以上の場合に他の条件にほとんど影響されることなく視程が低くなっている点等は物理現象的に整合性のあった条件



図-1 目視による視程レベルの判別基準

表-1 各視程レベルの出現数

	視程レベル			
	1	2	3	4
出現数	1063	213	271	72
合計	1619			

表-2 テストデータの推定結果

		決定木に基づく視程レベル				
		1	2	3	4	正答率
目視判別に基づく視程レベル	1	189	25	24	8	77%
	2	2	0	1	0	67%
	3	5	7	20	7	13%
	4	8	0	7	0	53%
実際の視程レベルよりも悪い視程レベルを推定した確率		93%	78%	87%	100%	

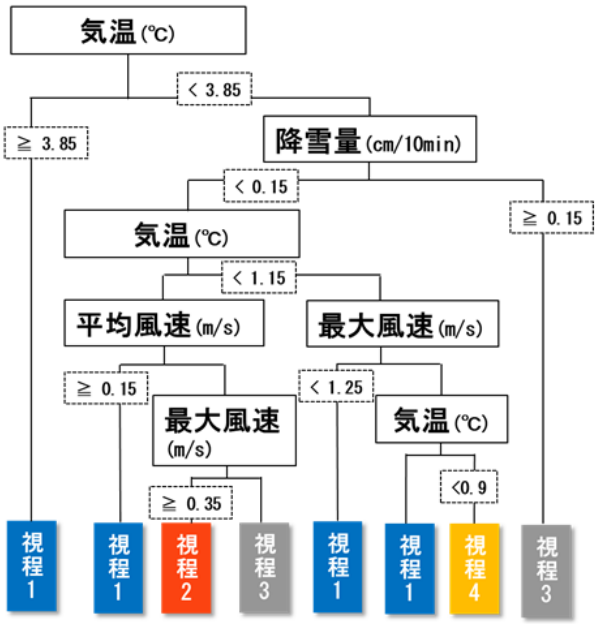


図-2　視程レベル推定の決定木概略図

表-3　各視程レベルに定義した仮想変数

	視程1-1	視程1-2	視程1-3	視程1-4	視程 2	視程3-1	視程3-2	視程4
仮想変数	0.145	0.806	0.176	0.375	1.037	1.284	2.084	2.100

分岐となっていた．上記を踏まえて，本研究では構築された決定木の分岐フローに基づき，視程レベルは細分類したものを用いた．ここでそれぞれ細分類される視程レベル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-3** に示すように定義した．ここでの変数は大きくなるほど視程レベルが悪くなる傾向にあることを意味しており，視程 1 は走行速度へ与える影響が 0 という定義の基で，それぞれの値を決定した．

表-4　各路面状況に定義した仮想変数

	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				

b)　視程レベルと区間平均車速の時系列変化

a)での手順に基づき定義される仮想的な変数と区間平均車速を特定の期間及び区間で時系列的に集計した結果が**図-3** のようになった．ここでの対象区間等は後述の過去のスタックの発生事例 1 に該当するもので，区間平均車速は 30 分単位の集計値を示す．

c)　路面状況と区間平均車速の時系列変化

路面状況と区間平均車速の時系列変化を分析するに当たり，著者ら [7]は前項の視程レベルと同様の手法で，30 分降雪量，気温，推定路面積雪量から路面状況を 12 路面に分類・推定することができる決定木を構築している．本研究では，先の決定木を用いて分岐に基づく路面状況について視程と同様に仮想変数を**表-4** 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 という定義の基で，それぞれの値を決定した．上記を踏まえて，特定の期間及び区間で時系列的に集計した結果が**図-4** のようになった．ここでの対象区間等は後述の過去のスタックの発生事例 1 に該当するもので，区間平均車速は 30 分単位の集計値を示す．

(3)　状態空間モデルによる区間平均車速の推定

本研究では特定の区間を走行する車両群の平均車速を区間平均車速として時系列的に推定する手法として，線

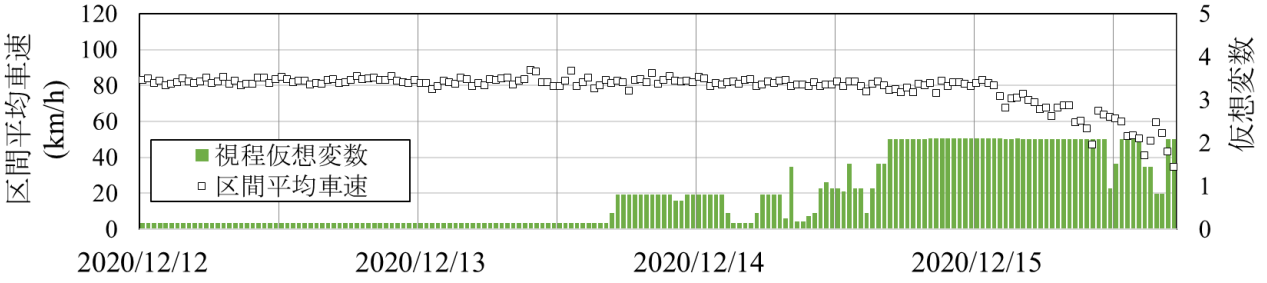


図-3　区間平均車速と視程レベル(仮想変数)の時系列変化

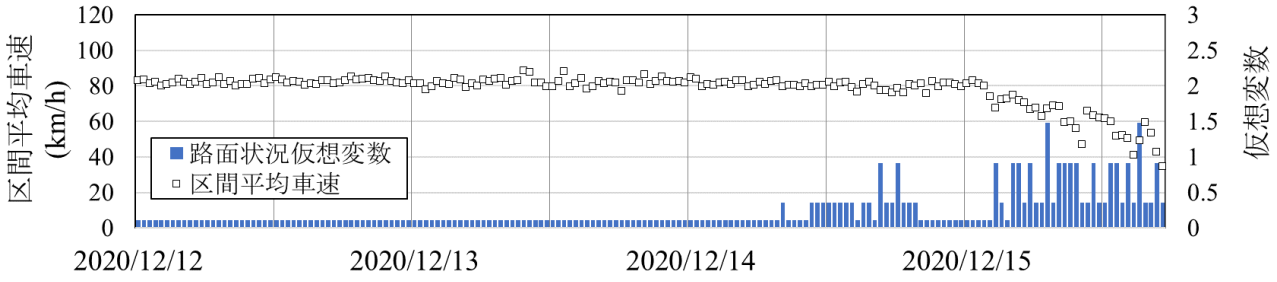


図-4　区間平均車速と路面状況(仮想変数)の時系列変化

形ガウス状態空間モデルを用いる．状態空間モデルは，確率的な状態の遷移に従い，観測値が得られていると仮定しているモデルで，説明変数の回帰係数を特定の分布に従って時系列的に変化するように推定することができる．本研究では正規ホワイトノイズ(平均値が0の正規分布)に従い遷移するものと定義する．ここでモデルを構成する説明変数を選定するに当たり，(2)より視程レベルと路面状況はどちらも悪化すると区間平均車速に低下させるという一定の関係性があることが確認できた．また変数間の相関も高くなっていた．これはどちらの変数も，仮想変数として定量化するに当たり，気温と降雪量で共通の変量の重要度が高いことによるものだと考えられる．状態空間モデルの変数として 2 説明変数型のモデルで推定する場合には，変数間の相関が高いため，回帰係数の推定結果に問題が生じることが予想される．このことから状態空間モデルの説明変数として，除雪車の通過履歴が考慮され政策変数となり得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，状態空間モデル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も，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．

4. 提案手法の定式化

前章を踏まえて構築する状態空間モデルの観測方程式及び状態方程式を式(1)，式(2)に示す．

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 $[\eta(t) \sim N(0, {\sigma_\eta}^2)]$

ここで路面状況仮想変数は前章にて用いた決定木に従い推定される値である．モデルを適用する際には，対象とする地点を通過した除雪車の経過時間と最寄りの IC から得られる気温及び降雪量の 3 変数から時系列的に路面状況を定量化した値を説明変数として用いた．また目的変数である区間平均車速はスタックの発生地点を含む，デジタル道路ベースにて定められるリンクを走行した同一方向の車両群の平均速度を ETC2.0 から時系列的に集計したもの用いた．また目的変数と説明変数はどちらも 30 分単位で算出・観測した値を用いた．各パラメータの算出に関しては最尤法で推定し，カルマンフィルタリング及びスムージング処理を行った．導出にはプログラミングソフト R の KFAS package [注 1)]を使用した．詳細なフローやメカニズムについては省略する．

5. 過去のスタック発生事例にモデルを適用

(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，発生の 2 週間程度前から発生の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．

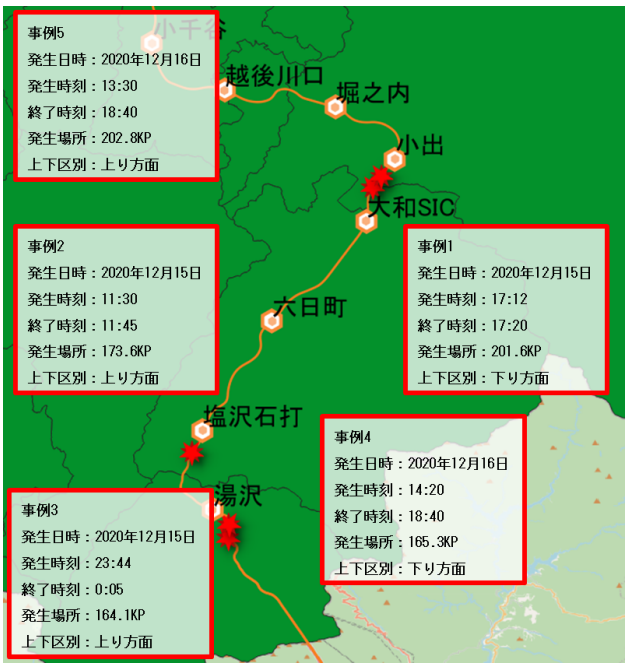


図-5 対象としたスタックの発生位置及び概要

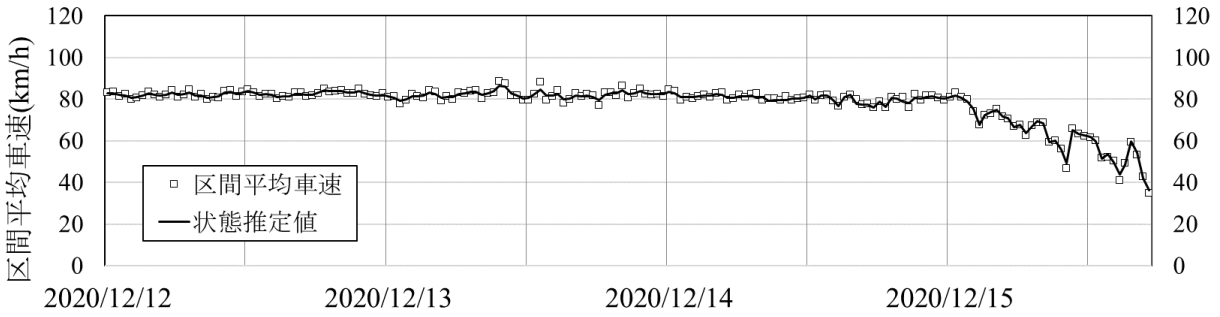


図-6　事例 1 における区間平均車速の推定結果

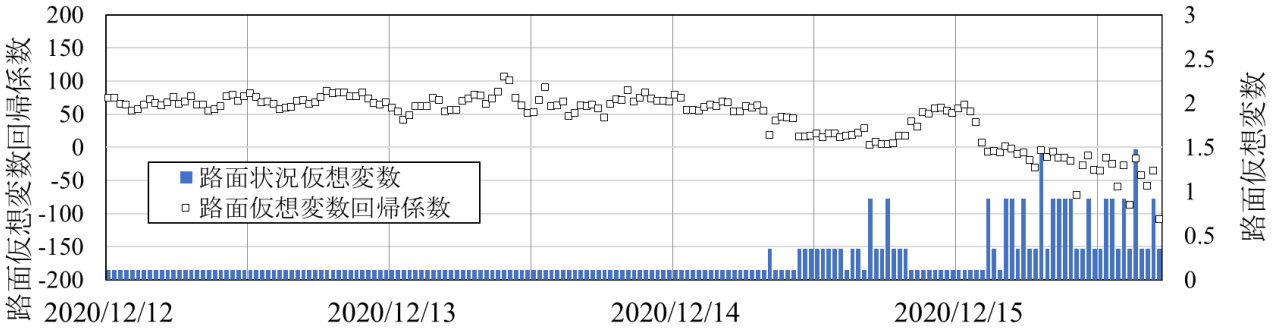


図-7　事例 1 における路面仮想変数及び回帰係数の時系列変化

表-5　各事例における過程誤差及び観測誤差

	事例 1	事例 2	事例 3	事例 4	事例 5
過程誤差 σ_η	13.05	4.04	8.48	5.94	20.56
観測誤差 σ_ε	1.18	3.75	1.39	2.40	1.43

(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．

(3)　スタック発生直前の異常値の検出

図-7 より，スタックの発生直前には回帰係数が負に大きく発散していることが確認できた．これを踏まえて，路面仮想変数回帰係数の遷移増減量の分散はスタックの発生に近づくにつれて，より大きな値で極端に更新されているのではないかという仮定の基，逐次的に回帰係数遷移増減量の分散値を算出して，それを最終的なスタック発生時までに算出される分散量と比較した割合を導出したものが**図-8** のようになった．**図-8** において横軸左端はスタック発生の 72 時間前時点の各数値を示しており，右端の分散割合が 1 を示している時点が，スタックが発生したと記録されている時点を示している．

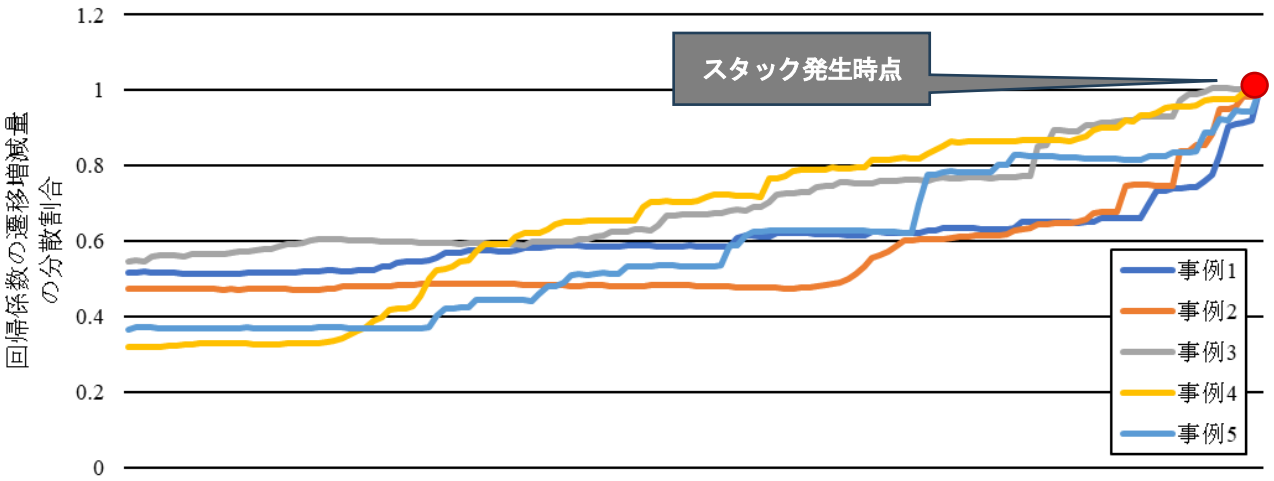


図-8　回帰係数の遷移増減量に対する分散の変化

表-6　各路面状況化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				

次に各事例における，各路面状況下での回帰成分のパラメータ量は**表-6** のようになっていた．ここで回帰項は回帰係数と路面仮想変数の積を示しており，回帰項の平均値が，実際に該当の路面状況が要因で減少した区間平均車速を意味する

(4)　導出結果に対する考察

図-6 より，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車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．また低減の傾向は，スタックが発生する 12 時間以上前から確認でき，**図-7** と併せて路面状況による区間平均車速への影響が多いことが確認できる．**図-7** より，路面状況仮想変数の回帰係数は各路面状況に対して，一定の値付近にて推定されていることが確認できた．またスタックの発生直前に関しては，前述のように極端に回帰係数が負に発散している時点がいくつか確認された．これは，例えば同じ黒シャーベットに分類される路面状況であっても，スタックの発生直前には何らかの要因により，平常時の黒シャーベットよりも走行性能が低下していることを意味している．本研究ではそのような事象がスタックの発生リスクが高い異常事象であるという定義の基，後述の各値の算出を行った．

上記を踏まえて，状態空間モデルにて導出される過程誤差が，無降雪の平常時から逐次更新されてどの程度まで増加したか算出した結果が**図-8** のようになった．より詳細に，**図-8** に示される数値は，最終的にスタック発生時までで導出された回帰係数の遷移増減量の分散値を基準とした，各時点までに逐次更新された回帰係数遷移増減量の分散値の割合を示している．**図-8** の横軸左端は前述のように各事例ともスタック発生の 72 時間前時点を示している．ここで共通してどの事例も，72 時間前時点では降雪がなかったことから，該当時点での値は湿潤１路面のみのパラメータ量を示しているといえる．その後，降雪により湿潤２，湿潤３，黒シャーベット１路面等が出現して回帰係数の遷移増減量の分散値は最終的に２倍近くまで増加することが確認できた．上記は５事例で，増加速度に差はあるものの共通して同じ傾向があったことから，回帰係数の遷移増減量の分散値はスタック発生リスクに関する指標として，適当であるといえる．しかし，本研究では路面状況仮想変数の設定手法の関係上，前述のように路面状況が変化した場合に，回帰係数がある値に切り替わるよう変化するため，各路面状況の出現数に応じて回帰係数の遷移増減量の分散値も変化することに留意しなければならない．併せて本研究では，モデルの構築期間としてスタック発生から２週間前までを対象期間としており，その期間を延長した場合には湿潤１路面の割合も多くなることから，分散値の増加割合は上記とは異なることに留意する必要がある．

表-6 より，各路面状況の回帰項の平均値と標準偏差を算出した結果，前述と同様にスタックの発生に近づくにつれて出現数が増加した路面状況の回帰係数は総じて大きな分散量になっていることが確認できた．また各事例で回帰項の平均値は異なった結果となっていた．これ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を構築した期間及びサンプル数の少なさ等が異なった要因として考えられる．今後，提案したモデルのパラメーター量をより正確で妥当な値とするためには，同一区間におけるサンプル期間の拡大及び，道路線形等の特徴毎に算出結果を比較し，定量的に評価することが必要であると考える．このことは**表-5** に示す観測誤差が事例ごとにばらつきがあったことからも同様のことが考えられる．また**表-6** で得られた値は，除雪作業等により路面状況を変化させる場合や，気象予報で路面状況の悪化が予測される場合等に，仮の値としてモデルに与えることで，前述の回帰係数の遷移増減量の分散予測値を算出す

ることができることから，スタックの発生リスクの変化を予測することも可能である．また先ほど，今後の課題点として挙げた路面状況の仮想変数の設定の手法に関しても，**表-6** の値を用いることで，回帰係数が路面状況毎に切り替わらないような変数設定もできるようになると考えられる．総じて，これらを実務的に活用できるレベルまでに担保できる値とするためには，さらなるサンプルの拡幅及び適用事例数を増やす必要がある．

6. 結論

本研究では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状態空間モデルを構築した．また構築したモデルは路面状況の仮想変数を説明変数として設定して，各パラメータ量を過去のスタックの発生事例に適用することで算出した．算出した結果として，路面状況仮想変数の回帰係数はスタックの発生に近づくにつれて，負に大きく発散していた．上記を踏まえて，回帰係数の遷移増減量の分散値を逐次算出した結果から，スタックの発生には平常時までの値と比較して 2 倍近い値となっていることが確認できた．これは黒シャーベット等で定義される同一の路面であったとしても，スタックの発生直前には何らかの要因(視程等)により，走行性能の低下が引き起こされていると考えられ，上記の値の変化はスタックの発生リスクに関する指標として，適した指標であると考える．また各路面状況毎に回帰成分の特徴量を算出した結果からも，スタック発生直前に出現数が多くなっていた路面では，回帰係数の分散量が多くなっていることが確認できた．上記より，本研究で目的としたスタックの発生リスクに関して，構築したモデルにおける路面状況回帰係数の逐次分散値はスタックの発生に近づくほど増加する傾向があり，危険指標としての妥当性を確認することができた．また構築したモデルにおける，路面状況仮想変数は管理用カメラによるモニタリングや，路面積雪量の観測等を行っていない地点でも，路面状況を一定の精度により把握することができており，各事例における適用結果からも汎用性に優れた変数の設定手法であったと考える．

今後の課題としては事例ごとにモデルの観測誤差や回帰係数に異なる特徴量であったことから，サンプル期間の拡張や道路線形等の潜在的な要素について定量的な評価をおこなう必要があると考える．またそれらの結果を踏まえて，算出結果の予測精度についても，検証していく必要があると考える．

NOTES

注1) Jouni Helske (2017). KFAS: Exponential Family State Space Models in R. Journal of Statistical Software, 78(10), 1-39. doi:10.18637/jss.v078.i10.

REFERENCES

1) 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.]
2) 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.]
3) 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.]
4) 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.]
5) 小島崇幸：高速道路の冬期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.]
6) 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.]
7) 針原拳太,佐野可寸志,加藤哲平,原山哲郎：冬期高速道路における路面状況を考慮した走行速度の時系列モデルの構築，[第 43 回交通工学研究発表会論文集, 2023.]