ニューラルネットワークによる路面凍結発生確率の簡易予測手法

森近 守*1,a) 齋藤 靖史*1 古堅 雄士*1

1. はじめに

路面凍結対策は冬期道路管理を行う上で、重視すべき課題の一つである。近年、路面凍結対策にあたり先行研究として、路面凍結予測に関する研究には、路面温度、露点温度、気圧配置などに着目し、具体的な基準値を設定する手法[1]があり、路面状態の異常検知に関する研究には畳み込みニューラルネットワーク(CNN: Convolutional Neural Network)を用いたCCTVカメラ画像解析による手法[2]などがある。文献[1]は実運用されており、文献[2]は降雪時の道路路面状態の自動判別正答率で概ね85%であることから、ある程度の高確率で路面状態の種類を判別しており、実用化に向けた研究が進められている。路面凍結は車両のスリップ事故に直結し、車両滞留が発生することにより企業活動や市民生活に多大な影響を与えるため、凍結発生前から凍結防止剤散布などを適時かつ適切に実施するための情報提供が重要となる。

一般的に豪雪地帯では、冬期における降雪や路面凍結への 対策が徹底されており、住民の降雪や路面凍結に対する対応 能力も高い[2]。一方で、降雪の少ない低頻度降雪地域におい ては道路気象観測装置は少なく、また、道路管理用 CCTV カ メラによる常時監視は少ない人員で複数業務に対応してい る監視員には困難であるため、道路管理者や除雪協力業者ら の経験による判断に頼った降雪対策や路面凍結対策を行っ ている。そのため、近年における雪処理の担い手不足の影響 は、道路気象観測・監視装置などによる路面凍結対策の合理 化が困難な低頻度降雪地域において、より深刻になることが 想定される。本稿は、低頻度降雪地域の冬期夜間における無 降水凍結を含む路面凍結対策に主眼を置き、気象予報データ を用いた浅層順伝播型ニューラルネットワーク(SFFNN: Shallow Feedforward Neural Network) による路面凍結発生確率 の簡易予測手法の提案により、道路管理者に危険度を発生確 率として情報提供することで、雪処理の担い手不足の時代に おける道路管理者による路面凍結防止作業の適時かつ適切 化を行う判断材料として寄与することを目的とする。

2. 統計的機械学習によるアプローチ

これまで、道路気象観測・監視装置などによる独自の観測・監視網を持たない路線では、道路管理者が気象庁や民間気象情報サービス事業者が提供する気象予報データ(気温、相対湿度、降雨、降雪など)と地域気象特性を踏まえ、凍結対策として翌早朝までに凍結防止剤散布を実施している。先行研究において、川畑ら^[1]は、路面温度、露点温度、気圧配置な

どから低頻度降雪地域に適用できる無降水凍結発生予測手法を提供している。しかし、凍結発生確率については言及しておらず、低頻度降雪地域を管轄する道路管理者にとって、巡回する人員の配置、監視箇所の優先順位、凍結防止剤散布の実施時機などの決定を合理的かつ効率的に判断するためには、さらなる情報が必要である。筆者らは、路面凍結判断材料として凍結発生確率予測値を採用することにより従来よりも道路管理者に対して、路面凍結前の適時かつ適切な意思決定支援ができるものと考える。

本稿では、路面凍結発生確率の予測にあたり、川畑ら[1]の 手法を発展させ、路面温度と路面湿数から統計的機械学習で 非線形分類問題を扱う SFFNN を用いた冬期夜間の路面凍結 発生確率の簡易予測手法を提案する。本提案では、路面凍結 発生メカニズムにおいて、凍結発生に関する最も基本的な特 徴量である温度と湿度(水分)の2変数(2次元)に限定する。 SFFNN 中間層(1層目)と出力層(2層目)には、2 次元のま まで、表現力を高くできることが期待され、扱いやすい2次 元 2 次多項式特徴量(交互作用項を含む)^[3]を用いたロジス ティック回帰(LOGR:Logistic Regression)モデルを構築する。 さらに、中間層(1層目)の LOGR モデルを2層化すること により非線形の表現力を獲得する[4]。これにより、冬期夜間 の路面凍結発生確率予測精度の向上が可能となる。なお、先 行研究である川畑ら^[1]の手法を一部引用するにあたり、路面 温度は、藤本ら^[5]によって導出された単回帰(SLR: Simple Linear Regression) モデルをノミナルモデルとし、これに疑似 ガウス雑音を印加し、この不確かさを加えたデータに SLR を用いて再構築したモデルによる予測値を採用した。

3. SLR による路面温度予測仮想モデルの構築

冬期で日射のない夜間において気温と路面温度の相関性は高く、郊外区間と山間区間で決定係数 $\mathbf{R}^2 \simeq 0.92$ 、橋梁区間で $\mathbf{R}^2 \simeq 0.87$ となり学習データに対して当てはまりの良い \mathbf{SLR} モデルが導出されている $\mathbf{S}^{[5]}$ 。本稿では、路面凍結発生確率の簡易的な予測にあたり、凍結発生に関するパラメータの一つである路面温度は藤本ら $\mathbf{S}^{[5]}$ の \mathbf{SLR} モデルの中から特に凍結が発生しやすい橋梁区間をノミナルモデル(図1)の例とし、筆者らは、このノミナルモデルに自由度調整済み決定係数 $\mathbf{AR}^2 \simeq 0.7$ 程度となるように疑似ガウス雑音を印加した不確かさを含むデータに \mathbf{SLR} を用いて再構築したモデルを未知変動の影響緩和が期待できるモデル (ここでは仮想モデルと呼ぶ) とし、この仮想モデルにより気温から路面温度を

予測する。仮想モデルは、ノミナルモデルよりも予測精度は低下するが、一般的に AR²≥ 0.7 程度であれば予測に適用可とされるので、未知データに対する予測は実用上問題ないものとする。以下に SLR モデルの導出手順を示す。

(導出手順)

R² または AR² は、未知のデータに対する予測精度を表しているわけではないので、本稿では、SLR ノミナルモデルに疑似ガウス雑音を印加し、あえて AR² を低下させ SLR モデルを再構築することで、路面凍結の可能性が高くなる気温範囲内の未知データに対して予測が大きく外れることがないようにできるものと仮定した。

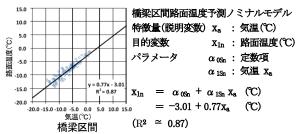


図1 気温と路面温度の相関関係(橋梁区間)[5]

① 路面温度予測ノミナルモデル(SLR ノミナルモデル) [5]

$$\mathbf{x}_{1n} = \alpha_{0Sn} + \alpha_{1Sn} \, \mathbf{x}_{a}$$
 (°C)
= -3.01 + 0.77 \mathbf{x}_{a} (°C) (1)

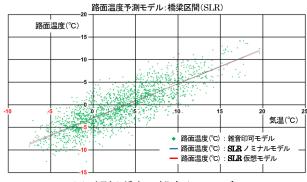
② 再構築データ(SLR ノミナルモデル+疑似ガウス雑音 G_N) 疑似ガウス雑音 G_N は、気温測定時点の実測値を平均値とし、自由度調整済み決定係数 $AR^2 \simeq 0.7$ 程度となるように標準偏差 $\sigma=2.5$ でを設定することにより生成する(図2)。なお、気温データ(実測値)は「埼玉県秩父市 2017 年 2 月、2018 年 2 月、2019 年 2 月」の気象観測データ [6] より引用した。

$$\mathbf{x}_{1Gn} = \mathbf{x}_{1n} + \mathbf{G}_{N}$$
 (°C)
= -3.01 + 0.77 \mathbf{x}_{a} + \mathbf{G}_{N} (°C) (2)

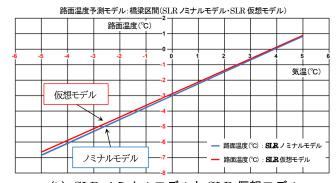
③ 路面温度予測仮想モデル(SLR 仮想モデル)

図 2(a) の疑似ガウス雑音印加モデルに SLR を適用する。

$$x_1 = \alpha_{0S} + \alpha_{1S} x_a$$
 (°C)
= -2.88 + 0.75 x_a (°C) (3)
(AR² \(\approx 0.69)



(a) 疑似ガウス雑音印可モデル



(b) SLR ノミナルモデルと SLR 仮想モデル図 2 路面温度予測モデル(橋梁区間 SLR モデル)

4. SFFNN による路面凍結予測

無降水凍結予測に関する研究は、路面温度、露点温度、 気圧配置などに着目し、具体的な基準値を設定することで 道路管理者や道路利用者らに注意・警戒情報を提供してい る^[1]。しかし、気象予報の降水確率や発雷確率のように危 険度をパーセンテージで評価するための情報提供ができて いない。本稿では、都市圏郊外や橋梁を管轄する道路管理 者にとって、冬期路面の凍結防止作業合理化推進の一助と なる情報の一つになるものと期待できる路面凍結発生確率 予測値を提供する手法を提案する。

4.1 先行研究

川畑ら^[1]は、無降水凍結に関する現地の地域気象特性と 道路構造特性の理解、きめ細かな実況把握および現象理解 を深化(図3)させ、その両者を生かした予測手法(図4) を整備している。また、そのPDCAを回し続けることで高 品質な無降水凍結予測提供を実現している。

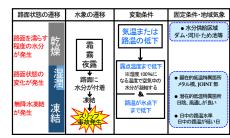


図3 無降水凍結発生のメカニズム(仮説)[1]



図 4 無降水凍結の予測フロー^[1]

4.2 提案手法

確率的識別モデルの一つである LOGR は、1層のみでは 線形分類しかできないが、多層化(ここでは2層化)すること により非線形の表現力を獲得することができる^[4]。本提案で は、過学習に陥りやすい高次元高次多項式(交互作用項を含 む)線形モデルではなく、特徴量(説明変数)を低次の2次元 2次多項式(交互作用項を含む)とし、同一学習データを用い た LOGR モデルを2層化することで過学習に陥りにくい SFFNN モデル(非線形分類モデル)を構築する。式(4)に LOGR モデル構築の基本となる完全2次元2次多項式特徴 量(交互作用項を含む)^[3]を示す。

$$\phi(\mathbf{x})^{T} = (1, \mathbf{x}_{1}, \mathbf{x}_{2}, \mathbf{x}_{1}^{2}, \mathbf{x}_{2}^{2}, \mathbf{x}_{1}\mathbf{x}_{2})$$
(4)

本稿では、SFFNN モデルの中間層(1層目)を2種類構築するにあたり特徴量として、式(4)の完全2次元2次多項式特徴量(交互作用項を含む)を用いるのではなく、式(5)(6)の不完全2次元2次多項式特徴量(交互作用項を含む)を用い、同一の気象観測データを学習データとして LOGR を適用する。これら二つのLOGR モデルを SFFNN の中間層(1層目)とし、これらを2層化した SFFNN 路面凍結発生確率予測モデルを提案する。

4.3 SFFNNによる路面凍結発生確率予測モデルの構築

4.3.1 特徴量選択

特徴量は凍結発生の主要因、学習結果の解釈性の良さ、気象データ入手の容易さなどを考慮し、選択することが重要である。本稿では、SFFNN 中間層(1層目)に路面温度と路面湿数による不完全2次元2次多項式特徴量(交互作用項を含む)を用いて、LOGRモデルを2種類構築する。SFFNN出力層(2層目)には、中間層(1層目)の出力である凍結発生確率予測値を特徴量としてLOGRを適用し、SFFNNモデルを構築する。

表 1 特徴量

(a) SFFNN 中間層(1 層目) n=1,2

特徴量(説明変数)		重み係数	目的変数	
定数項	1	βoLn	路面凍結発生確率	Zn
路面温度予測値(℃)	X_1	βıLn	(0~1)	
路面湿数予測值(℃)	X_2	β _{2Ln}		
路面温度予測值(℃)^2	X_1^2	β _{3Ln}		
路面湿数予測値(℃)^2	X_2^2	β _{4Ln}		
路面温度予測值(℃) *路面湿数予測值(℃)	X_1X_2	β _{5Ln}		

(b) SFFNN 出力層(2 層目)

• •			•	
特徴量(説明変数)		重み係数	目的変数	
定数項	1	γ ofn	路面凍結発生確率	v
路面凍結発生確率予測值(LOGR1)	Z_1	7 IFN	(0~1)	
路面凍結発生確率予測值(LOGR2)	$\mathbf{Z_2}$	γ 2FN		
路面凍結発生確率予測值(LOGR1)^2	\mathbb{Z}_1^2	γ 3FN		
路面凍結発生確率予測值(LOGR2)^2	$\mathbf{Z_2}^2$	γ 4FN		
路面凍結発生確率予測値(LOGR1)	Z_1Z_2	γ sen		
*路面凍結発生確率予測值(LOGR2)				

注) 路面湿数:= 路面温度-路面露点温度

ここでは(大気)相対湿度 ~ 路面相対湿度(地表面相対湿度)と仮定する。湿数は、気温から(大気)露点温度を

引いた値で表されるが、本稿では、路面温度(もしくは路面温度予測値)から路面露点温度(路面温度と路面相対湿度からTetensの式を用いて算出)を引いた値を路面湿数と定義する。湿数3℃以下の地域を湿域と呼び、その地域には雨や霧があると判断し、この状態を凍結に必要な水分があると仮定した。

4.3.2 SFFNN 中間層(1層目)モデルの構築

前述したように、SFFNN 中間層(1層目)となる LOGR モデルは、式(4)(5)の不完全2次元2次多項式特徴量(交互作用項を含む)を用いてLOGR モデルを2種類構築する。線形モデルでは一般的に2次元2次多項式は、2次元1次多項式よりも分類性能の向上が期待できることから2次元2次多項式を採用した。以下に構築したLOGR モデルを示す。目的変数のデータは気象学的根拠には乏しいが、式(7)(11)を簡易的基準として暫定採用し、仮想データとして生成する。

① LOGR モデル1の特徴量(不完全2次元2次多項式)

$$\phi_1(\mathbf{x})^{\mathrm{T}} = (1, \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2^2, \mathbf{x}_1 \mathbf{x}_2) \tag{5}$$

② LOGR モデル 2 の特徴量(不完全 2 次元 2 次多項式) $\phi_2(\mathbf{x})^T = (1, \mathbf{x_1}, \mathbf{x_2}, \mathbf{x_1}^2, \mathbf{x_1}\mathbf{x_2})$ (6)

③ 路面凍結発生モデルの目的変数(暫定)if (路面温度 ≤0°C) ∧ (路面湿数 ≤3°C)

$$-$$
 then 1 (凍結あり) 目的変数(\mathbf{Z}_1 , \mathbf{Z}_2) (7)

(4) 学習データ

過去の気象観測データ^[6]から「埼玉県秩父市2017年2月、2018年2月、2019年2月」を学習データとして引用。

⑤ LOGR モデル 1(図 6)

表 2 LOGR モデル 1

特徴量(説明変数)	重	み係数	目的変数		
定数項	1	β oli	5. 4923	路面凍結発生確率 Zı	
路面温度予測値(℃)	X 1	βılı	-4. 4805	(0~1)	
路面湿数予測值(℃)^2	X_2^2	β 4L1	-0.8975		
路面温度予測値(℃) *路面湿数予測値(℃)	X_1X_2	β 5L1	1. 2782		

$$Z_{1} = \frac{1}{1 + \exp\{-(\beta_{0L1} + \beta_{1L1} X_{1} + \beta_{4L1} X_{2}^{2} + \beta_{5L1} X_{1} X_{2})\}}$$
(8)

⑥ LOGR モデル 2(図 6)

表 3 LOGR モデル 2

特徴量(説明変数)	重	み係数	目的変数		
定数項	1	β 0L2	7. 9902	路面凍結発生確率 Z ₂	
路面温度予測值(℃)	X ₁	β 1L2	-5. 7535	(0~1)	
路面湿数予測值(°C)	X_2	β 2L2	-4. 1347		
路面温度予測值(℃)^2	X_1^2	β 3L2	0. 4104		
路面温度予測值(°C)*路面湿数予測值(°C)	X_1X_2	β 5L2	0.8731		

$$Z_2 = \frac{1}{1 + \exp\{-(\beta_{01.2} + \beta_{11.2} X_1 + \beta_{21.2} X_2 + \beta_{31.2} X_1^2 + \beta_{51.2} X_1 X_2)\}}$$
(9)

4.3.3 SFFNN 出力層(2層目)モデルの構築

SFFNN 出力層(2層目)は、LOGR モデル1と LOGR モデ

ル2の2層化により非線形分類モデルを構築する[4]。

① LOGR モデル 3 の特徴量(完全 2 次元 2 次多項式)

$$\phi(z)^{T} = (1, z_{1}, z_{2}, z_{1}^{2}, z_{2}^{2}, z_{1}z_{2})$$
(10)

② 路面凍結発生モデルの目的変数(暫定) if (路面温度 ≤0°C) ∧ (路面湿数 ≤3°C)

4 学習データ

LOGR モデル1および2の出力値(中間層の出力値)。

⑤ LOGR モデル 3

表 4 LOGR モデル 3

特徴量(説明変数)	重	み係数	目的変数		
定数項	1	γ ofn	-6. 1412	路面凍結発生確率 y	
路面凍結発生確率予測值(LOGR1)	Z_1	γ 1FN	15. 2380	(0~1)	
路面凍結発生確率予測值(LOGR2)	\mathbb{Z}_2	γ 2FN	-0.6914		
路面凍結発生確率予測值(LOGR1)^2	$\mathbf{Z_1^2}$	γ 3FN	-8. 3496		
路面凍結発生確率予測值(LOGR2)^2	\mathbb{Z}_{2}^{2}	γ 4FN	7. 1061		
路面凍結発生確率予測值(LOGR1) *路面凍結発生確率予測值(LOGR2)	Z ₁ Z ₂	γ 5FN	-2. 2057		

$$y = \frac{1}{1 + \exp\{-(\gamma_{0FN} + \gamma_{1FN} Z_1 + \gamma_{2FN} Z_2 + \gamma_{3FN} Z_1^2 + \gamma_{4FN} Z_2^2 + \gamma_{5FN} Z_1 Z_2)\}}$$
(12)

⑥ SFFNN モデル(図 6)

中間層(1層目)
$$Z_{1} = \frac{1}{1 + \exp\{-(\beta_{0L1} + \beta_{1L1}X_{1} + \beta_{4L1}X_{2}^{2} + \beta_{5L1}X_{1}X_{2})\}}$$

$$Z_{2} = \frac{1}{1 + \exp\{-(\beta_{0L2} + \beta_{112}X_{1} + \beta_{212}X_{2} + \beta_{3L2}X_{1}^{2} + \beta_{5L2}X_{1}X_{2})\}}$$

出力層(2層目)
$$y = \frac{1}{1 + \exp\{-(\gamma_{0EN} + \gamma_{1EN} Z_1 + \gamma_{2EN} Z_2 + \gamma_{3EN} Z_1^2 + \gamma_{4EN} Z_2^2 + \gamma_{5EN} Z_1 Z_2)\}}$$

5. 数値シミュレーション

5.1 目的と条件

本シミュレーションの目的は、路面凍結発生確率予測への適用を提案する SFFNN モデルの実フィールドでの有効性検証を行うにあたり、過去の気象観測データを用いて有効性を机上検証することである。シミュレーションには、気象庁が Web サイト上^[6]で無料提供している過去の気象観測データと式(3)(8)(9)(12)を用いて、図7のブロック線図の手順で実施した。

5.2 結果と考察

過去の気象観測データ^[6]から「埼玉県熊谷市 2016 年 1 月」をテストデータとして、本提案の SFFNN モデルに用 いたシミュレーション結果を表 6、図 8 および 9 に示す。

① 降水なし(無降水)の場合

気象観測データ (表 6) から 1 月 12 日 21:00 において気温 0.4 \mathbb{C} 、降水量 0mm、路面温度予測値 -2.6 \mathbb{C} 、相対湿度82%、路面湿数予測値 2.5 \mathbb{C} (湿域)における路面凍結確率

は、0.99(99%)となった。このときの風速は、1.0m/s(至軽風: $0.3\sim1.5m/s$)であることから風は弱く、湿域が放射冷却により路面(地表面)の冷却が大きくなることで、接地逆転層が形成され、凍結が始まっていたものと推定され、本シミュレーション結果と概ね一致する(図8(a))。

② 降水・降雪(新雪)ありの場合

1月18日0:00 において気温3.5℃、降水量2mm、路面温度予測値-0.2℃、相対湿度85%、風速2.8m/s(軽風:1.6~3.3m/s)、路面湿数予測値2.2℃における路面凍結確率は、0.73(73%)、1時間後1:00の気温1.3℃、降水量3mm、路面温度予測値-1.9℃、相対湿度90%、風速1.0m/s(至軽風)、路面湿数予測値1.4℃では、0.99(99%)、2時間後の2:00以降においても0.99(99%)となり、同時刻以降8:00まで降雪(新雪)を記録している。文献[7](表5および図5)の地表面の熱的パラメータ(熱容量と熱伝導率の積)の値を参照すると、新雪時では冷却は大きく、深夜から早朝にかけて路面は凍結状態になったものと推定(このとき積雪を記録)され、本シミュレーション結果と一致する(図8(b))。

表 5 代表的な土壌その他の熱的パラメータの概略値[7]

地面の状態	熱容量 CGPG		熱的パラメータ Cgρgλg
	$(Jm^{-3}K^{-1}) \times 10^6$	$(Wm^{-1}K^{-1})$	$(J^2s^{-1}K^{-2}m^{-4}) \times 10^6$
乾燥砂地・粘土	1.3	0. 3	0. 39
湿り砂地・粘土	3. 0	2. 0	6. 0
新しい軽い雪	0. 2	0.1	0. 02
古い雪	0.8	0.4	0. 32
コンクリート	2. 1	1. 7	3, 6
アスファルト	1.4	0. 7	1.0
田園集落地域			2. 0
深い積雪地域			0.1
氷 (0℃)	1. 93	2. 24	4, 32
水 (0℃)	4. 18	0. 57	2. 38
空気(静止)	0. 0012	0. 025	0. 00003

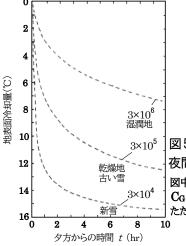


図5 地表面の状態による 夜間の冷却量の違い^[7] 図中の数値は地表層の熱的パラメータ Cgρgλg(J²s⁻¹K⁻²m⁻⁴) ただし、最大冷却量が 17℃のとき.

この結果から、降雨、降雪、霧などにより路面が高湿度となることで水分が路面に付着し、路面温度 0℃以下となる状態であれば、温度と湿度(水分)のみに着目した本提案の予測モデルで凍結発生確率を予測できる可能性があることがわかる。目的変数のデータは観測データではなく、

前述した簡易的基準に基づいたものではあるが、テストデータを分類性能の評価指標である ROC-AUC で評価した結果、0.9989 となり、予測モデルとして必要な性能を有している可能性が示唆された。さらに同一路面温度における相対湿度の違いによる凍結発生確率を見ると、路面温度予測値 -2.0° C、相対湿度 76%(路面湿数予測値 3.6° C)における

凍結発生確率は、0.002(0.2%)、相対湿度 82%(路面湿数予測値 2.6℃)では 0.99(99%) となった(図 9)。これは路面温度 0℃以下かつ相対湿度 80%以上の状態において路面凍結が発生しやすくなることを本提案の SFFNN 路面凍結発生確率予測モデルは示唆している。

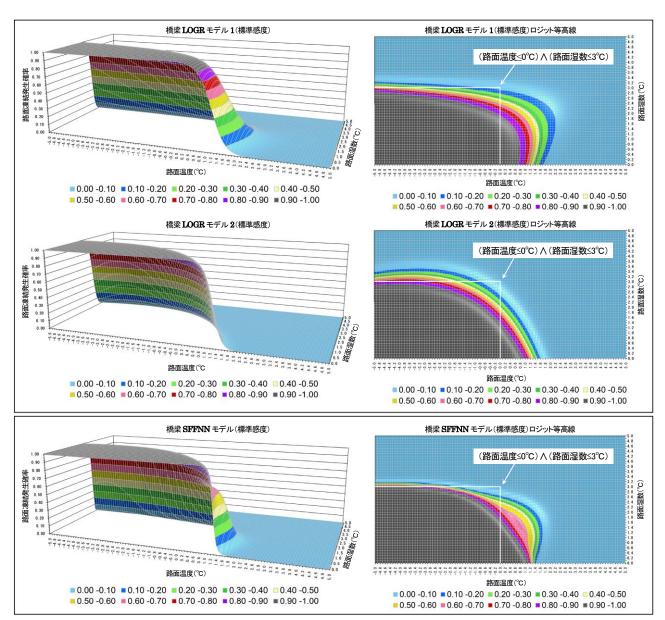


図 6 SFFNN 路面凍結発生確率予測モデル(標準感度)とロジット等高線

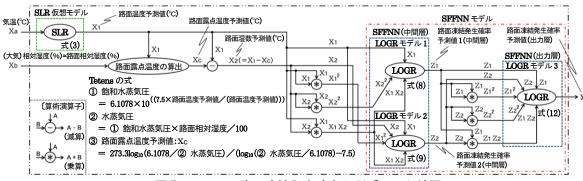


図7 SFFNN 路面凍結発生確率予測ブロック線図

表 6 シミュレーション結果(抜粋)

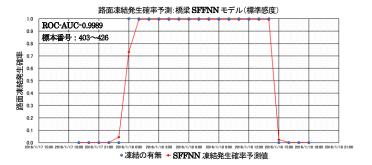
気温、相対湿度、風速、降水量、降雪、積雪は気象庁 Web サイト [6] より引用

							,,,,,	. , .,					
標本 番号	年月日時	気温(℃)	相対 湿度 (%)	大気 湿数 (℃)	風速 (m/s)	降水量 (mm)	降雪 (cm)	積雪 (cm)	路面 温度 (℃)	路面 露点温度 (℃)	路面 湿数 (℃)	凍結発生 0:なし 1:あり	SFFNN 凍結発生 確率
1	2016/1/1 1:00	4.3	63	6.4	2.7	0	0	0	0.4	-5.8	6.2	0	0.00
2	2016/1/1 2:00	4.2	60	7.1	1.5	0	0	0	0.3	-6.5	6.8	0	0.00
3	2016/1/1 3:00	4.0	59	7.3	1.8	0	0	0	0.1	-6.9	7.0	0	0.00
4	2016/1/1 4:00	4.7	55	8.3	2.6	0	0	0	0.7	-7.3	8.0	0	0.00
5	2016/1/1 5:00	4.9	53	8.8	4.8	0	0	0	0.8	-7.7	8.5	0	0.00
6	2016/1/1 6:00	5.2	49	9.8	5.4	0	0	0	1.0	-8.4	9.5	0	0.00
280	2016/1/12 16:00	4.0	60	7.0	0.9	0	0	0	0.1	-6.7	6.8	0	0.00
	2016/1/12 17:00	3.6	62	6.6	1.2	0	0	0	-0.2	-6.5	6.4	0	0.00
	2016/1/12 18:00	3.0	66	5.7	1.1	0	0	0	-0.6	-6.2	5.5	0	0.00
	2016/1/12 19:00	1.8	76	3.8	1.2	0	0	0	-1.5	-5. 2	3.7	0	0.00
	2016/1/12 20:00	1.3	80	3.1	1.5	0	0	0	-1.9	-4.9	3.0	1	0.17
	2016/1/12 21:00	0.4	83	2.5	1.0	0	Ö	l ő	-2.6	-5.1	2.5	li	0.99
	2016/1/12 22:00	-0.4	82	2.7	0.6	0	0	0	-3. 2	-5.8	2.6	li	0.99
287	2016/1/12 23:00		79	3. 2	0.6	0	0	0	-3.5	-6.6	3.1	0	0.33
288	2016/1/13 0:00		79	3.1	1.2	0	0	0	-4.5	-7.5	3.1	0	0.65
289	2016/1/13 1:00		80	3.0	1.3	0	0	0	-4.1	-7.0	2.9	1	0.98
290	2016/1/13 2:00		77	3.5	1.8	0	0	0	-4. 2	-7.6	3.4	0	0.00
291	2016/1/13 3:00		79	3.1	0.3	0	0	0	-4.8	-7.9	3.1	0	0.69
292	2016/1/13 4:00		80	2.9	0.7	0	0	0	-5.7	-8.6	2.9	1	0.03
293	2016/1/13 5:00		80	2.9	0.8	0	0	0	-5. 4	-8.3	2.9	1 1	0.97
294	2016/1/13 6:00		81	2.8	0.9	0	0	0	-5.6	-8.3	2.7	l i	0.99
295	2016/1/13 7:00		83	2.5	1.5	0	0	0	-5. 6	-8.0	2.4	1 1	0.99
296		-1.9	79	3.1	1.0	0	0	0	-4.3	-7.4	3.1	0	0.61
297	2016/1/13 9:00	-0.2	77	3.5	0.7	0	0	0	-3.0	-6.5	3.4	0	0.00
							_	_		_		_	
403	2016/1/17 19:00	7.0	41	12.3	1.4	0	0	0	2.4	-9.5	11.9	0	0.00
	2016/1/17 20:00	6.5	60	7.2	2.7	0	0	0	2.0	-4.9	6.9	0	0.00
	2016/1/17 21:00	6.5	57	7.9	0.9	0	0	0	2.0	-5.6	7.6	0	0.00
	2016/1/17 22:00	4.8	75	4.0	3.0	1		0	0.7	-3.2	3.9	0	0.00
407	2016/1/17 23:00	4.0	82	2.8	2.6	l	0	0	0.1	-2.6	2.7	0	0.04
408	2016/1/18 0:00	3.5	85	2.3	2.8	2	0	0	-0.2	-2.4	2.2	1	0.73
409	2016/1/18 1:00	1.3	90	1.4	1.6	3	0	0	-1.9	-3.3	1.4	1	0.99
410	2016/1/18 2:00	0.4	93	1.0	0.0	3	1	1	-2.6	-3.5	1.0	1	0.99
411	2016/1/18 3:00	0.4	94	0.8	1.0	4	1	2 5	-2.6	-3.4	0.8	1	0.99
412	2016/1/18 4:00	0.2	94	0.8	1.3	5	3		-2.7	-3.6	0.8	1	0.99
413	2016/1/18 5:00	0.3	94	0.8	0.5	4	3	8	-2.7	-3.5	0.8	1	0.99
414	2016/1/18 6:00	0.3	94	0.8	0.0	5	2	10	-2.7	-3.5	0.8	1	0.99
415	2016/1/18 7:00	0.3	94	0.8	2.2	6 7	2	12	-2.7	-3.5	0.8	1	0.99
416	2016/1/18 8:00	0.4	94	0.8	2.9		3	15	-2.6	-3.4	0.8	1	0.99
417	2016/1/18 9:00	1.3	93	1.0	1.9	5 7	0	14	-1.9	-2.9	1.0	1	0.99
	2016/1/18 10:00	1.5	92	1.1	3.4			11	-1.7	-2.9	1.1	1	0.99
	2016/1/18 11:00	1.2	92	1.1	4.2	6	0	10	-2.0	-3.1	1.1	1	0.99
	2016/1/18 12:00	1.4	91	1.3	4.6	3	0	9	-1.8	-3.1	1.3	1	0.99
	2016/1/18 13:00	1.9	91	1.3	5.0	1	0	9	-1.4	-2.7	1.3	1	0.99
	2016/1/18 14:00	2.8	90	1.5	4.8	0	0	8	-0.8	-2.2	1.4	1	0.99
	2016/1/18 15:00	4.4	82	2.8	3.3	0	0	8	0.4	-2.3	2.7	0	0.02
	2016/1/18 16:00	5.1	78	3.5	4.1	0	0	8	1.0	-2.4	3.4	0	0.00
	2016/1/18 17:00	5.8	76	3.9	2.1	0	0	8	1.5	-2.3	3.8	0	0.00
426	2016/1/18 18:00	6.5	68	5.5	5.3	0	0	8	2.0	-3.2	5.3	0	0.00

注)表6の路面温度、路面露点温度、路面湿数は予測値を示す。



(a) 降水なし(無降水)の場合



(b) 降水・降雪(新雪)ありの場合 図 8 シミュレーション結果

橋梁 SFFNN モデル(標準感度)ロジット等高線

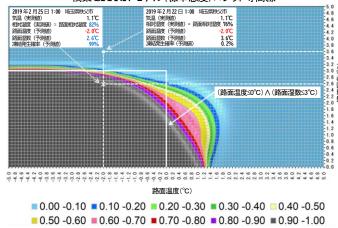


図9 相対湿度の違いによる路面凍結発生確率の比較

6. おわりに

本提案は、路面温度と路面湿数を用いた限定的な条件下でのシミュレーションではあるが、路面温度と路面湿数から冬期で日射のない夜間の路面凍結発生を確率として情報提供できることが示唆された。これにより、路面凍結発生の危険度が分りやすくなることで、道路管理者による凍結対策作業の合理化・効率化に加え、道路利用者の凍結発生予測箇所での素早い回避行動などを可能にすることが期待できる。今後、本提案手法(仮説)の有効性検証方法を検討し、実フィールドでの検証を行う予定である。

参考文献

- [1] 川畑 貴義, 吉永 創, 戸部 明, 竹内 茜: 局地的な凍結 に対する独自気象予測の提供, 第 31 回ゆきみらい研究 発表会,(2019)
- [2] 李 瑾, 阿部 雅人, 杉崎 光一, 中村 一樹, 上石 勲: AI 技術を活用した冬季道路路面判別の効率化, AI・データサイエンス論文集(土木学会), Vol.J1, pp.210-216, (2020)
- [3] 佐久間 淳:機械学習(6)カーネル/確率的識別モデル 1, 筑波大学 情報科学類 2019 年度講義資料(機械学習) pp.7-16,(2019)
- [4] 鹿島 久嗣: 統計的モデリング基礎⑥ ~ニューラルネットワーク~ 京都大学 工学部 情報学科 2021年度講義資料 pp.2-15,(2021)
- [5] 藤本 明宏, 徳永 ロベルト, 高橋 尚人: 気温と路面温度 の相関に基づく路面温度予測の広域化手法に関する研究, 第 60 回(平成 28 年度) 北海道開発技術研究発表会、(2017)
- [6] 気象庁: http://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html
- [7] 近藤 純正: 地表面に近い大気の科学 理解と応用,東京 大学出版会 pp.109-136,(2000-9)