

# 論文 東北地方におけるコンクリート道路構造物のソルトスケーリング危険度マップの作成

田中 篤 悠登\*1・羽原 俊祐\*2・山本 英和\*3・武田 翔\*4

**要旨**：筆者らは、アメダスの観測データから得られた $-7^{\circ}\text{C}$ 以下となる日数および凍結防止剤の散布量観点から、岩手県の道路構造物のソルトスケーリング危険度マップを2019年に提案した。本論文では、この手法により、東北地方の道路構造物のソルトスケーリング危険度について検討した。アメダスの観測点の多くは平野部に集中しており、山岳部において実状との乖離が考えられるため、本論文では、標高が300m以上の地域を対象に、 $-7^{\circ}\text{C}$ 以下となる日数のマップについて標高および緯度に基づく補正を行い、道路構造物のソルトスケーリング危険度マップを作成した。2019年のマップよりも精緻なスケージング危険度マップとなった。

**キーワード**：凍害、スケージング、凍結防止剤、最低気温、東北地方、危険度マップ

## 1. はじめに

新設構造物の材料設計および既設構造物の維持管理において、ソルトスケーリング対策を講じるためには、構造物の供用環境のソルトスケーリング危険度について適切に把握する必要がある。これまで、気象データを基にコンクリート構造物の凍害劣化の危険度予測が行われ凍害危険度マップ<sup>1,2)</sup>が提案されている。危険度が低い地域でもスケージングによる凍害劣化が報告されており、必ずしも構造物の凍害による損傷と気温など自然環境から求めた凍害危険度が一致するわけではないことが報告<sup>3)</sup>されている。これらの凍害危険度マップは主に内部崩壊によるひび割れを想定しており、凍結防止剤の散布に起因するソルトスケーリング劣化について適応が可能か不明である。また、国土交通省東北地方整備局では、「東北地方における凍害対策に関する参考資料(案)」<sup>4)</sup>において、凍結防止剤の散布によるソルトスケーリング劣化の危険度について、岩城ら<sup>5)</sup>のGISにおける気象データおよび地形データを基にした東北地方の凍害ハザードマップと、凍結防止剤散布量データマップとを掛け合わせて東北地方の凍害危険度を区分している。しかし、ソルトスケーリング劣化のメカニズムの観点に基づく判定がなされておらず、有用性について懐疑的な面もある。

これまで筆者らは、ソルトスケーリングの劣化メカニズムの解明のため、NaCl水溶液の濃度と冷却時の最低温度の影響について検討し、最低温度が $-5\sim-10^{\circ}\text{C}$ の範囲においてスケージングが生じる温度の上限の閾値(スケージング温度)を見出した<sup>6,7)</sup>。この温度は、濃度の増加に伴い低下し、各濃度のNaCl水溶液の凝固点よりも $5\sim 6^{\circ}\text{C}$ 程度低い結果となった。このスケージング温度をも

とに、岩手県内における気象庁の自動気象データ収集システムであるアメダス(AMeDAS)<sup>8)</sup>の観測データを用い算出した1冬期で $-7^{\circ}\text{C}$ 以下となる日数と、国土交通省東北地方整備局および岩手県所管の道路における凍結防止剤の散布データをもとに、岩手県におけるスケージング危険度マップを報告<sup>7)</sup>した。県東部の北上山地を通過する道路および国道4号線の盛岡以北においてスケージングが厳しいことを示唆する結果となった。

本研究では、岩手県においてスケージングの危険度を検討した手法を用いて、東北地方の道路構造物のソルトスケーリング危険度マップの作成を行った。アメダスの観測点が平野部や都市部に集中していることにより山間部を通過する路線の危険度が過小評価されている可能性があるため、本研究では、 $-7^{\circ}\text{C}$ 以下となる日数のマップについて標高および緯度による補正を行うことで、岩手県の修正版および東北地方のマップを作成した。

## 2. ソルトスケーリング危険度マップの作成概要

図-1に道路構造物のソルトスケーリング危険度マップを作成の手順を示す。道路構造物のソルトスケーリング危険度を評価するため、気象庁の自動気象データ収集システムであるアメダス(AMeDAS)<sup>8)</sup>の1日の最低気温の観測データおよび、各道路の凍結防止剤の散布量のデータを用いた。対象とするアメダスの観測点は、東北地方に点在する161の観測点と、東北地方周辺の茨城県、群馬県、栃木県および新潟県のうち18の観測点とした。東北以外の観測点についても対象としたのは、1日の最低気温が $-7^{\circ}\text{C}$ 以下となる日数のマップ(コンター図)を東北地方全域で作成するためである。2013年10月1

\*1 岩手大学 大学院 工学研究科 機械・社会環境システム工学専攻 修士(工) (学生会員)

\*2 岩手大学 理工学部 システム創成工学科 社会基盤・環境コース 教授 博士(工) (フェロー会員)

\*3 岩手大学 理工学部 システム創成工学科 社会基盤・環境コース 准教授 博士(理)

\*4 岩手大学 理工学部 システム創成工学科 社会基盤・環境コース

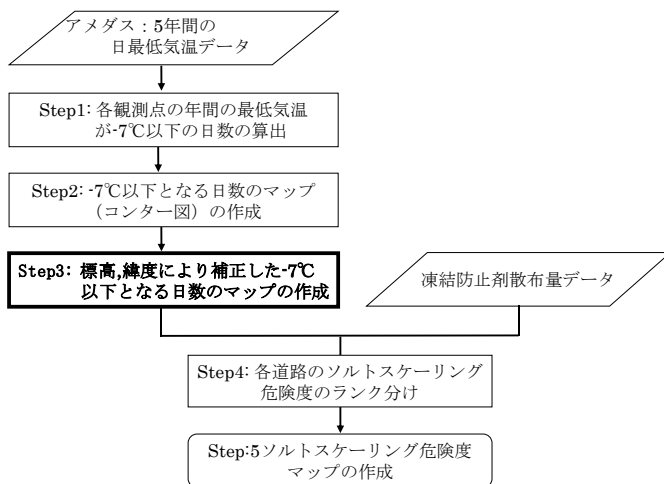


図-1 危険度マップ作成のフロー

日から2018年5月31日までの5年間の観測データを用いた。

Step1では、各観測点において、対象とした5年間で、1冬期ごとに-7℃以下となる日数を算出し、その平均を算出した。

Step2では、-7℃以下となる日数データと、各観測点の座標（緯度、経度）より、QGISの不整形三角網補間(TIN補間: Triangular Irregular Network)<sup>9)</sup>により、東北地方の-7℃以下となる日数のマップ（コンター図）を作成した。

アメダスの観測点の多くが平野の都市部に集中しているため、山地の観測点が少ない傾向があることから、山間部を通過する路線においてソルトスケーリング危険度評価の精度が低い可能性がある。山間部の路線での再現性を向上させるため、本論文ではこの工程を行うこととした。

Step3では、国土数値情報標高・傾斜度3次メッシュ(1kmメッシュ)データ<sup>10)</sup>の平均標高を用いて、-7℃以下となる日数のマップを緯度および標高により補正を行った。2019年の報告<sup>7)</sup>では、標高および緯度による補正を行わず、岩手県におけるソルトスケーリングの危険度マップを作成している。

Step4では、標高および緯度により補正した-7℃以下となる日数のマップと各道路の凍結防止剤の散布量のデータより、各道路の危険度をランク分けを行った。

Step5では、各道路のソルトスケーリング危険度をランク分けに基づき、道路構造物のソルトスケーリングの危険度マップを作成した。

### 3. ソルトスケーリング危険度マップの作成

#### 3.1.1 冬期に-7℃以下となる日数

図-2に東北地方における1冬期に-7℃以下となる日数のマップ（コンター図）を示す。宮城県から福島県の沿岸部や、秋田県から山形県の沿岸部を除くと多くの地

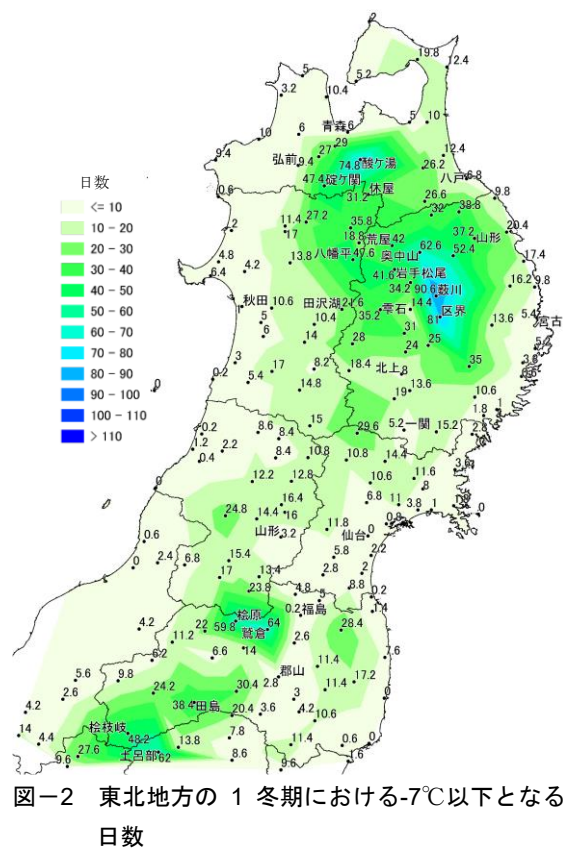


図-2 東北地方の1冬期における-7℃以下となる日数

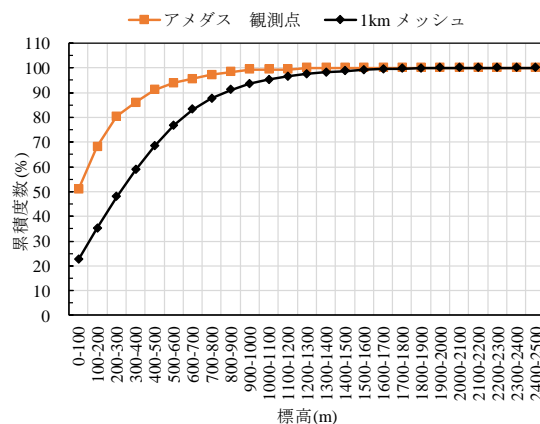


図-3 アメダスの観測点および東北地方の1kmメッシュ各地点の標高の累積度数分布

域で-7℃以下となる日数が20日以上程度である。-7℃以下となる日数が30日を超えるのは奥羽山脈、越後山脈および北上高地のあたりであり、-7℃以下となる地域から限定される。更に、50日を超えるような地域は、越後山脈、奥羽山脈の北部および北上山地に絞られる。

#### 3.2 標高および座標による-7℃以下となる日数の補正

図-3にアメダスの観測点および国土数値情報標高・傾斜度3次メッシュ(1kmメッシュ)データ<sup>10)</sup>の平均標高の累積度数分布を示す。アメダスの観測点では、標高100m以下が約50%、300m以下が約86%、500m以上が約9%である。一方、東北地方の各1kmメッシュでの平

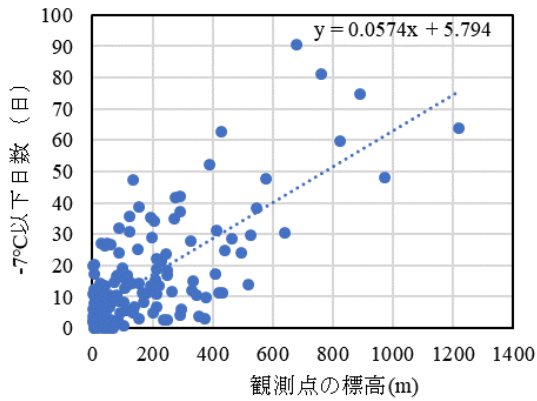
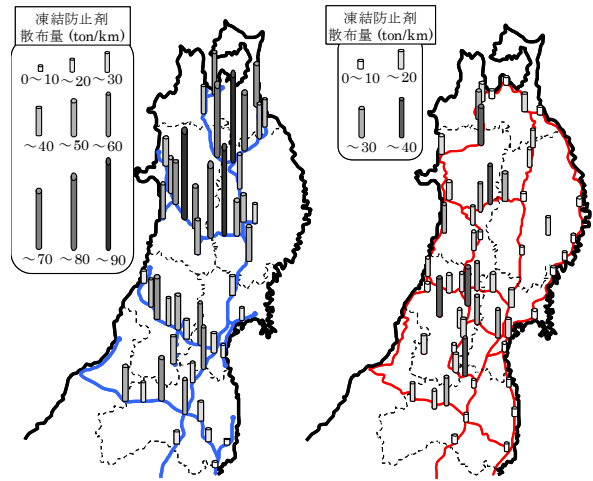


図-4 観測点の標高と東北地方の-7°C以下となる日数との関係



(a) 高速自動車道 (b) 国土交通省管轄

図-6 東北地方における凍結防止剤の散布量<sup>11, 12)</sup>

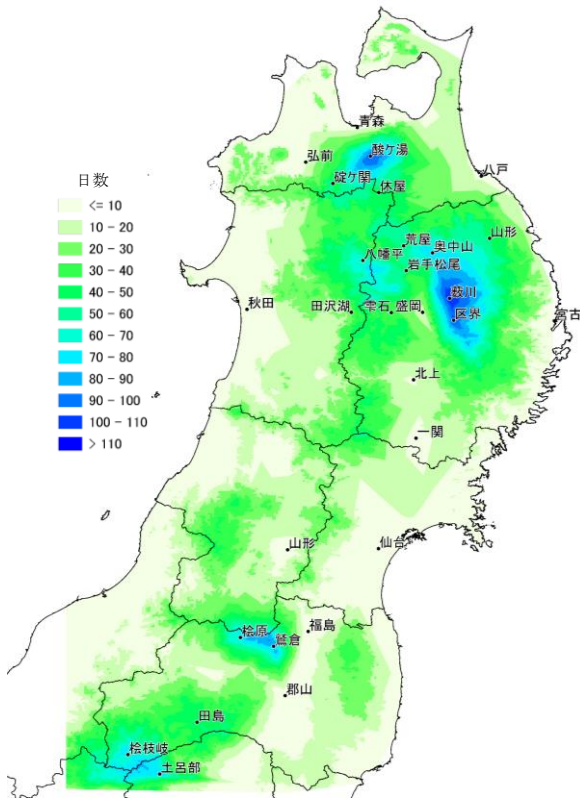


図-5 標高および緯度による補正を行った 1 冬期における-7°C以下となる日数

均標高の度数分布は、100m 以下が約 22%、300m 以下が約 58%、500m 以上が約 31%である。このことから、ここで使用したアメダスの観測点は、東北地方全体の地形において、標高が低い点に集中していることが分かる。山地の観測点が少ない傾向にあるため、山地を通過する道路において、観測点から得られた-7°C以下となる日数から作成したマップと、実温度を反映させた日数とが乖離していることが想定される。特に、標高の高い奥羽山脈、北上山地や磐梯山といった地域が挙げられる。本論文では、高地における-7°C以下となる日数の精度を向上

表-1 スケーリング危険度ランク

		凍結防止剤散布量 (t/km)	
		0~10	10 以上
-7°C 以下	0~20	1	2
	20~40	3	3
日数	40 以上	4	4

させるため、標高および緯度の影響を考慮した。

観測点の標高と東北地方の-7°C以下となる日数との関係を図-4 に示す。地図上の標高が高くなるほど、-7°C以下となる日数は増加する傾向にある。近似直線の傾きは 0.0574 であり、標高が 100m 高くなると日数が約 6 日増加することがこの結果からわかる。この標高の影響を日数に反映させることとする。各観測点の-7°C以下となる日数を目的変数とし、標高および緯度を説明変数として重回帰分析を行った。全観測点を対象として重回帰分析を行ったところ重相関が約 0.82 と高い相関が得られた。また、標高 300m 以上を対象とした場合には重相関が約 0.9 と高い相関が得られた。この重回帰分析を基に、標高 300m 以上の地点の-7°C以下となる日数について補正を行う。

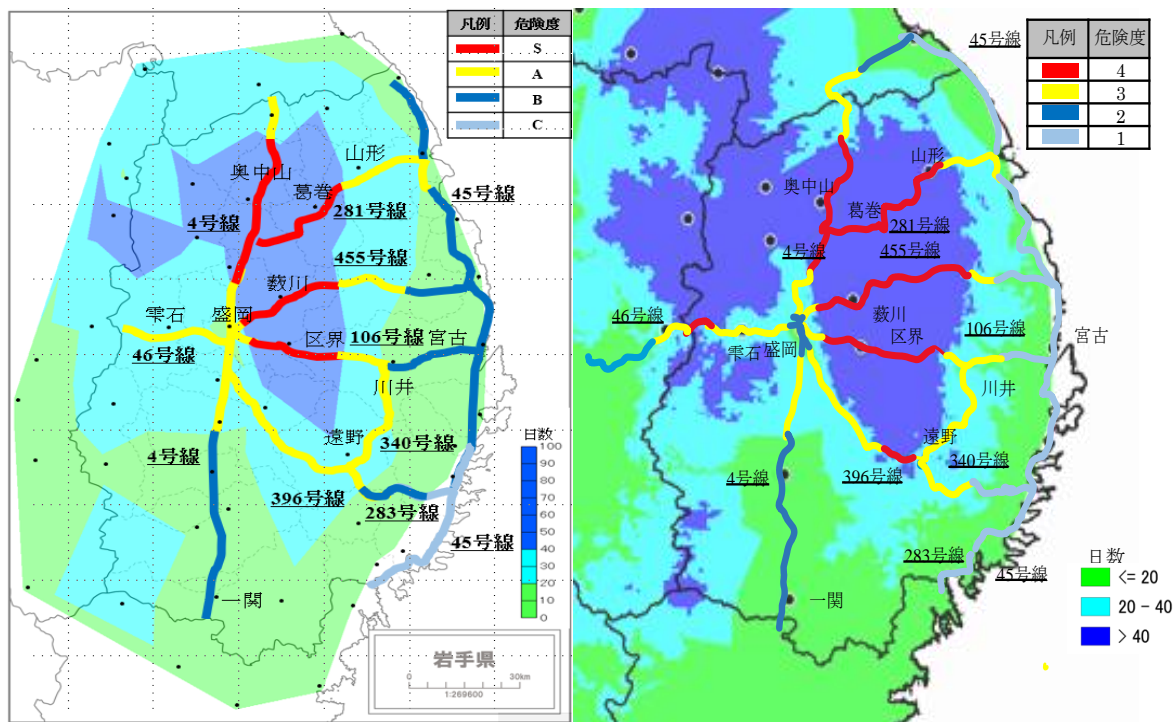
標高 300m 以上の地点での重回帰分析により得られた式を以下に示す。

$$N_{c-7} = 0.075 \times H + 11.683 \times L - 454.45 \quad (1)$$

$N_{c-7}$ : 算出した-7°C以下となる日数(日)

H: 標高(m) L: 緯度(°)

得られた式より、標高 300m 以上の各 1km メッシュの標高および緯度から-7°C以下となる日数を算出する。標高 300m 以上の地点を対象に、-7°C以下となる日数のマップ(図-2)に算出した値の 4 分の 1 を加えることで、



(a) スケーリング危険度マップ<sup>7)</sup>

(b) 標高および緯度補正した危険度マップ

図-7 岩手県におけるソルトスケーリング危険度マップ

標高および緯度により補正した-7°C以下となる日数のマップを作成した。標高および緯度により補正した-7°C以下となる日数のマップを図-5に示す。標高および緯度の影響を考慮したマップは、考慮する前の図-2に比べて、奥羽山脈、北上高地および磐梯山のあたりで日数が増加するような結果となった。

### 3.3 凍結防止剤の散布量

凍結防止剤の散布量について、図-6に東北地方における凍結防止剤の散布量データを表すマップを示す。図-6(a)は東日本高速道路(株)東北支社管内の高速自動車道にける凍結防止剤の散布状況<sup>11)</sup>を示す。このデータは平成20年の1年間における道路1kmあたりに散布された総量を示したものである。図-6(b)は国土交通省管轄の路線の凍結防止剤の散布状況<sup>12)</sup>を示す。また、国道104号、112号および113号の散布量については、東北地方における凍害対策に関する参考資料(案)<sup>4)</sup>を引用した。

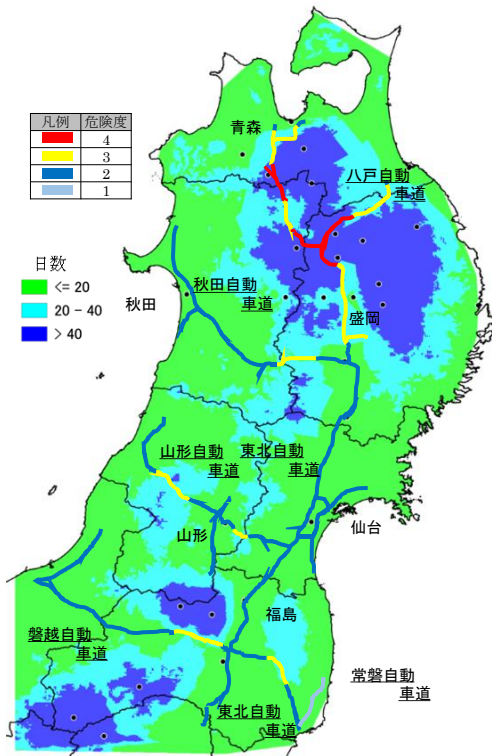
図-6(a)より、高速道路における凍結防止剤の散布量は、北東北3県(青森、秋田、岩手)の奥羽山脈のあたりが非常に多い。また、宮城と福島の間境も多い傾向がある。この区間は、カーブや起伏が多く、降雪量も多い区間である。図-6(b)より、国道における凍結防止剤の散布量は、太平洋側に比べて、日本海側および内陸部に多い傾向である。高速道路同様に内陸の標高が高い地域において散布量が多い傾向にある。高速道路と国道を比較すると、散布量が大きく異なる。この要因として、車両の走行速度や交通量等の利用の影響や道路の線形や幅

員等の道路構造の影響が挙げられる。

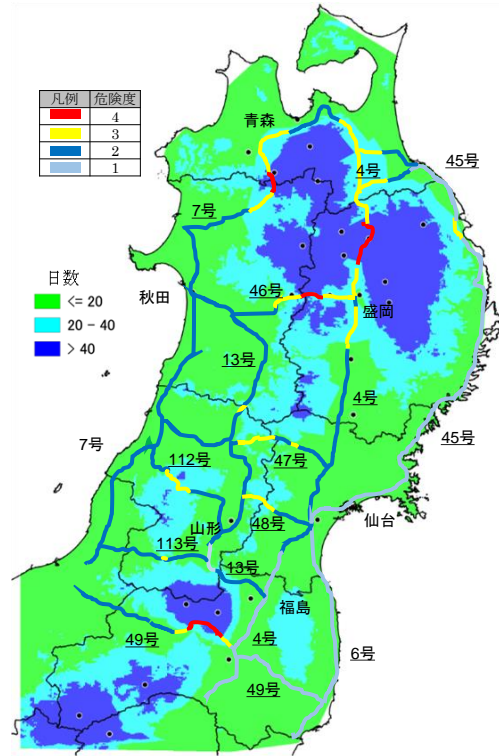
### 3.4 東北地方のソルトスケーリング危険度マップ

2019年の報告<sup>7)</sup>と同様に、-7°C以下のとなる日数と凍結防止剤の散布量より、ソルトスケーリングの危険度を分類した。その分類結果を表-1に示す。-7°C以下となる日数を0~20、20~40および40以上の3段階に分け、凍結防止剤の散布量を0~10および10以上t/kmの2段階に分け、4、3、2および1の4つのランクに分類した。数字が大きいほど、ソルトスケーリングの高く、2019年の報告とは、Sが4に、Aが3に、Bが2に、Cが1に対応する。スケーリング危険度の基準は、-7°C以下となる日数による凍結融解回数を主な因子と考え凍結防止剤の散布量を副因子と考えてランク分けした。

図-7に岩手県におけるソルトスケーリング危険マップを示す。図-7(a)は報告<sup>7)</sup>の標高および緯度の影響を補正していないマップである。図-7(b)は標高および緯度の影響を補正したものである。2019年に報告した図-7(a)で沿岸部の国道45号線の北部がBとなっているが、ランク分け時の誤植であり、新規のマップでは標高および緯度による補正とは関係なく正しい危険度1(Cに相当)に修正している。標高および緯度による補正により、図-7(b)では国道46号の盛岡西の雫石から仙岩峠において、スケーリングが激しいと想定されることが示された。この地域は、気象条件(気温、日射、降雪・降雨量)を基にして凍害の危険度を評価した長谷川らのマップにおいて凍害の危険度が3(やや大きい)と高く、さらに



(a) 高速自動車道



(b) 国土交通省管轄

図-8 東北地方における道路構造物のソルトスケーリング危険度マップ

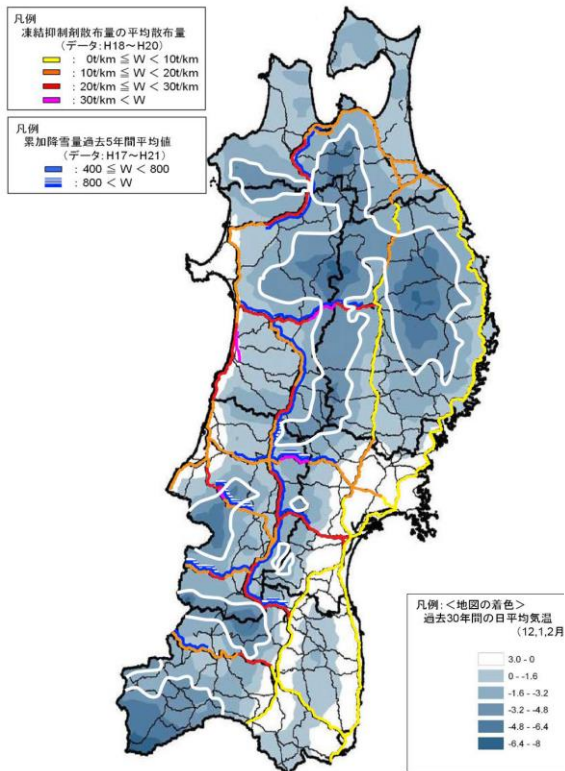


図-9 凍害区分3以上の地域と凍結抑制剤の散布量の関係<sup>4)</sup>

凍結防止剤の散布量が多いことから、ソルトスケーリングの危険度が高いことが想定されてる。同様に、「東北地

表-2 東北地方整備局が工事中または管理中の路線のうち対策種別がSの区間（特に厳しい凍害環境）<sup>4)</sup>

路線名	起点	終点
国道7号	秋田県大館市長走降場地内(kp400km)	青森県平川市(国道282号との交差点)
国道13号	福島県福島市飯坂町中野地内(kp20km)	山形県米沢市(kp29km)
国道46号	岩手県岩手郡聖石町橋場地内(kp25km)	秋田県仙北市田沢湖生保内地内(kp40k)
国道48号	宮城県仙台市作並地内(kp34km)	山形県東根市関山地内(kp39km)
国道49号	福島県耶麻郡猪苗代町山湯地内(kp97km)	福島県河沼郡河東町八田地内(kp121km)
国道112号	山形県西村山郡西川町月山沢地内(kp50km)	山形県鶴岡市田妻保地内(kp70km)
国道103号	奥入瀬バイパス	
宮古盛岡横断道路	以下の事業区間 宮古箱石道路のうち川井～箱石地区、平津戸松草道路、区界道路	

方における凍害対策に関する参考資料(案)」においても対策種別Sの地域である。そのため、標高および緯度による補正により、2019年に報告したマップよりも、実状に即していることが考えられる。

東北地方におけるスケーリング危険度マップを図-8に示す。図-8(a)は高速自動車道を対象としたマップである。図-8(b)は国土交通省管轄の道路を対象としたマップである。

高速道路の場合(図-8(a))、ソルトスケーリング危険度が高い路線は、花巻以北の東北自動車道と八戸道および、猪苗代湖や磐梯山の周辺の東北自動車道や磐越西線である。一方、東北自動車道の宮城県周辺および山形と秋田の沿岸部では、ソルトスケーリング危険度が低い地域である。傾向としては、凍結防止剤の散布量が多いものの、-7°C以下となる日数が低いためスケーリング危険度が低いと想定される。

国土交通省管轄の路線の場合(図-8(b)), ソルトスケーリング危険度が高い路線は, 高速道路同様に, 岩手県と青森県の奥羽山脈のあたりおよび, 猪苗代湖や磐梯山の周辺である。沿岸部を通る路線は, 日本海側で凍結防止剤の散布量が多いものの, -7℃以下の日数が少ないため, ソルトスケーリング危険度が低いと想定される。

### 3.5 既存のマップとの比較

ここでは, 試作したソルトスケーリング危険度マップの妥当性を検証する。既往の研究における凍害の危険度評価および構造物の点検では, ソルトスケーリング単体の評価は少なく, 内部ひび割れなどと統一されて評価がなされており, 比較が難しい。そこで本研究では, スケーリングが凍結防止剤の散布量により促進されることから, 凍害区分と凍結抑制剤散布量に基づく各路線の対策種別(東北地方における凍害対策に関する参考資料(案)4)との比較をすることとした。凍害区分3以上の地域と凍結抑制剤の散布量の関係を図-9に示す。また, 東北地方整備局が工事中または管理中の路線のうち対策種別がSの区間(特に厳しい凍害環境)を表-2に示す。

凍害対策資料案においてS区間とされている8路線の内5路線(国道7, 46, 49および103号, 宮古盛岡横断道路)については, 試作したソルトスケーリング危険度マップにおいても危険度が4と厳しい地域と想定される。国道103号線奥入瀬バイパス(青森県十和田湖周辺)については, 凍結防止剤の散布量が不明であるものの, -7℃以下になる日数が40日以上であることからソルトスケーリングの危険度が4となる。また, 盛岡宮古横断道路については, 岩手県版(図-7(b))で危険度が4である。

一方, 凍害対策資料案においてS区間の国道13, 48および112号では, 路線の多くの区間では2で, 部分的に1の区画が存在している。これらの結果より, 凍害対策資料案においてS区間は, 試作したソルトスケーリング危険度マップにおいて危険度が多くの区間で4または3と想定されており, ある程度妥当性がある事がわかった。

## 4. まとめ

1 冬期で-7℃以下となる日数と凍結防止剤の散布量に基づきスケーリング危険度マップを試作した。以下に本章で得られた知見を示す。

(1) 標高および緯度で補正した岩手県におけるソルトスケーリング危険度マップでは, 「東北地方における凍害対策に関する参考資料(案)」の対策種別がSの区間(特に厳しい凍害環境)とある程度一致する結果となった。また, 国道4号線の県北地域においてソルトスケーリングの危険度が高いことを示した。

- (2) 日本海の沿岸部を通る路線においては, 凍結防止剤の散布量が多いものの, -7℃以下となる日数が20日未満の地点が多く, ソルトスケーリングの危険性は低いと推定された。
- (3) 東北地方におけるソルトスケーリング危険度マップは, 国土交通省東北地方整備局の管理路線の凍害対策資料案においてS区間(特に厳しい凍害環境)とされている道路区間において半数以上のものとは危険度評価が一致した。しかし, ソルトスケーリング危険度マップでは, 国道48号および国道112号においてソルトスケーリング危険度が低く判定される結果となった。

### 参考文献

- 1) 長谷川寿夫, 藤原忠司: “凍害 コンクリート構造物の耐久性シリーズ”, 技報堂出版, pp.71-80, 1988
- 2) 成田健, 小山慎一郎, 三橋博三: 実構造物群の調査結果に基づく凍害損傷リスクマップの作成に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.19, No.1, pp.29-38, 2008
- 3) 日本コンクリート工学: 自然環境下のコンクリート劣化研究委員会 委員会報告書, pp. 6-17, 2018
- 4) 国土交通省 東北地方整備局: 東北地方における凍害対策に関する参考資料(案), 2017.3
- 5) 岩城一郎, 子田康弘, 石川雅美, 小山田桂夫: 東北地方におけるブリッジマネジメント支援ツールの構築, コンクリート工学論文集, Vol.24, No.3, pp.75-87, 2013.9
- 6) 田中館悠登, 羽原俊祐, 小山田哲也, 我満俊文: 凍結防止剤によるスケーリング現象に及ぼす冷却最低温度の影響とスケーリング温度, セメント・コンクリート論文集, Vol.70, pp. 371-377, 2016
- 7) 田中館悠登, 羽原俊祐, 山本英和, 馬場孝輔, 岩手県における最低気温および凍結防止剤散布量から求めるスケーリング危険度マップの提案, コンクリート工学年次論文集, 日本コンクリート工学会, Vol.41, p.839-846, 2019
- 8) 国土交通省 気象庁アメダス  
<https://www.jma.go.jp/jp/amedas/>
- 9) QGIS: Spatial Analysis (Interpolation) :  
[https://docs.qgis.org/3.4/en/docs/gentle\\_gis\\_introduction/spatial\\_analysis\\_interpolation.html](https://docs.qgis.org/3.4/en/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html)
- 10) 国土交通省 国土地理院 :  
<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html/>
- 11) 東日本高速道路(株)東北支社: 凍結防止剤散布量に関する統計データ, 2008
- 12) 国土交通省 東北技術事務所: 凍結防止剤散布量に関する統計データ, 2006~2008