論文　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

田中舘　悠登[*1]・羽原　俊祐[*2]・山本　英和[*3]・馬場　孝輔[*4]

要旨：近年，岩手県をはじめとする東北地域では，凍結防止剤の散布に伴い，スケーリングが顕著となり問題となっている。本研究では，スケーリング発生条件について評価し，その発生条件を基に最低気温と凍結防止剤の散布量から，岩手県におけるスケーリングの危険度マップを作成した。スケーリングは凍結防止剤の種類が異なった場合でも，-5℃以下で発生し，濃度が高いほどスケーリングが発生する最低温度の閾値は低くなることが分かった。作成したスケーリング危険度マップは，既往の凍害危険度マップとある程度一致した。加えて，国道 4 号線の県北区間ではスケーリングの危険度が高いことを示唆した。

キーワード：凍害，スケーリング，凍結防止剤，最低気温，小片凍結融解試験，危険度マップ

1. はじめに

東北地方における道路構造物の維持管理において，供用環境の凍害危険度について適切に評価することは重要な課題である。これまでの主な凍害危険度評価の代表例として，気温と日射量データに基づいた長谷川 [1)]により提案された凍害危険のマップがある。また，長谷川の提案した方法を基に気象庁の「メッシュ気候値 2000」を用いて凍害危険度を詳細に検討した成田ら [2)]が提案した凍害損傷リスクマップも存在する。しかし，これらの危険度マップの評価には凍結防止剤の散布の影響が考慮されておらず，凍結防止剤の散布に伴い劣化が顕著となるスケーリングの危険度を適切に評価できていない現状であると考える。また，凍結防止剤の散布が構造物の凍害に及ぼす影響について，気温，凍結防止剤の散布量および橋梁点検結果から評価した岩城ら [3)]の研究があるものの，スケーリングについては十分に評価されていない。スケーリングの危険度の評価が適切になされていない要因としてスケーリングの劣化メカニズムが明らかになっていない事も挙げられる。

これまで，筆者ら [4,5)]はスケーリングの劣化メカニズムの解明のため，モルタル配合，凍結防止剤溶液の濃度や冷却時の最低温度がスケーリング抵抗性に及ぼす影響について検討してきた。それらの検討より，スケーリングには NaCl 水溶液の凍結過程が影響を与えていると考えられ，スケーリングが生じる温度域が明らかになりつつある。

本研究では，スケーリングの発生条件を一般化させるため，NaCl と異なる凍結防止剤について，冷却最低温度が-5~-10℃の温度域において，最低温度と凍結防止剤水溶液の濃度との関係がスケーリングに与える影響について検討した。また，得られたスケーリングの発生条件を参考に，1 日の最低温度および凍結防止剤の散布量データを基に岩手県におけるスケーリングの危険度マップを試作した。

2. スケーリング試験概要

2.1 使用材料およびモルタル配合

ここでは，既報の研究 [5)]において，冷却最低温度と NaCl 水溶液濃度の関係がスケーリング抵抗性に及ぼす影響を検討したモルタルと同一配合のモルタル試料を作製した。セメントは市販の普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm^3）を使用し，細骨材は 2.5mm 篩を通過した表乾状態の盛岡市黒川産砕砂（表乾密度：2.85g/cm^3）を用いた。AE 剤等の混和剤は使用せず，NonAE モルタルとした。フレッシュ時の空気量は 2.8%であった。空気量の測定は，モルタル用のエアメータにより行った。

JIS R 5201 セメントの物理試験方法に従い，供試体を作製した。供試体は，1 日型枠内で初期養生し，脱型後に材齢 28 日まで水中養生を行った。

2.2 ソルトスケーリング抵抗性評価試験

提案した小片凍結融解試験法 [4, 6)]に従い，ソルトスケーリング抵抗性の評価方法を実施した。温度条件等は既報の研究 [5)]と同様に行った。湿式ダイヤモンドカッターを用いて，養生終了後の角柱供試体から，1 辺が約 8mm の立方体を切り出し，これを試験片とした。試験片 3 粒を 1 組とし，試験片 1 組の質量と凍結防止剤水溶液との質量比を 1：10 とし，試験片を凍結防止剤水溶液に浸漬させ凍結融解試験を実施した。冷却最低温度は，-5～-10℃

*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　工学部　社会基盤環境工学科

の範囲において 1℃間隔で設定し，センサー式温度計を用い，設定の温度と相違のないことを確認した。凍結防止剤として，NaCl, KCl および $CaCl_2$ を用いた。凍結防止剤水溶液として，NaCl 水溶液では質量濃度 6.0%, KCl および $CaCl_2$ では質量濃度 0.1，0.5，1.0，3.0 および 6.0%を使用した。1 日 1 サイクルの凍結融解（凍結 16 時間，融解 8 時間）を与えた。所定のサイクル終了後，試験片と凍結防止剤水溶液を分離し，試験片を 40℃で 24 時間乾燥させ，2.5mm ふるい上に留まった質量を測定した。試験前後の質量から質量残存率を求めた。スケーリングの進行度を定量的に示すため，質量残存率の推移を基にしたスケーリング耐久性指標（SDI）を用いる。SDI の計算は次の通りである。

(a) M サイクル終了時点での質量残存率が 90%以上の場合

SDI＝M サイクル終了時点での質量残存率（%）

(b) M サイクル終了時点での質量残存率が 90%未満の場合

$$SDI = P \times N / M \quad (1)$$

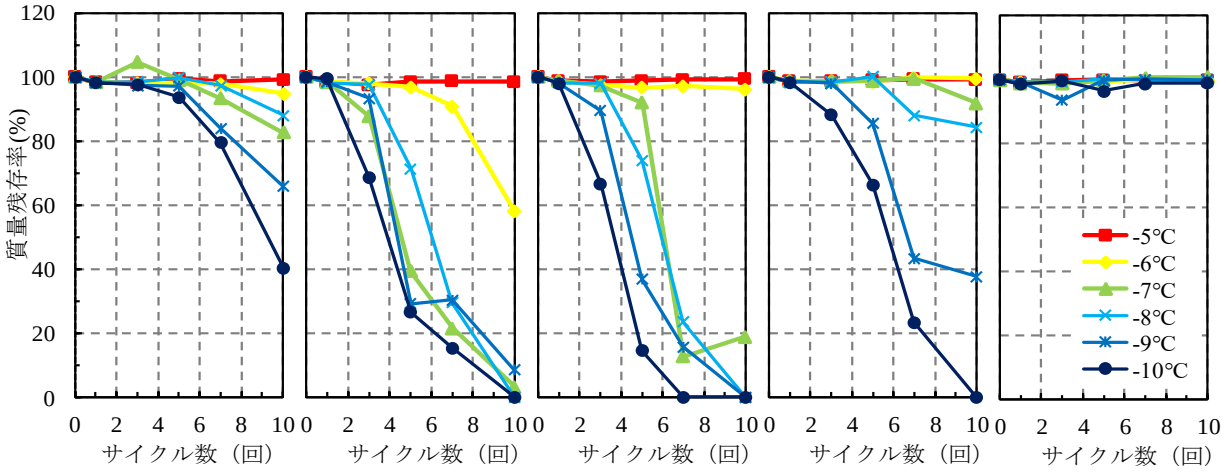
P＝基準となる質量残存率（%）

N＝質量残存率が P に達するサイクル数（回）

M＝試験終了を予定しているサイクル数（回）

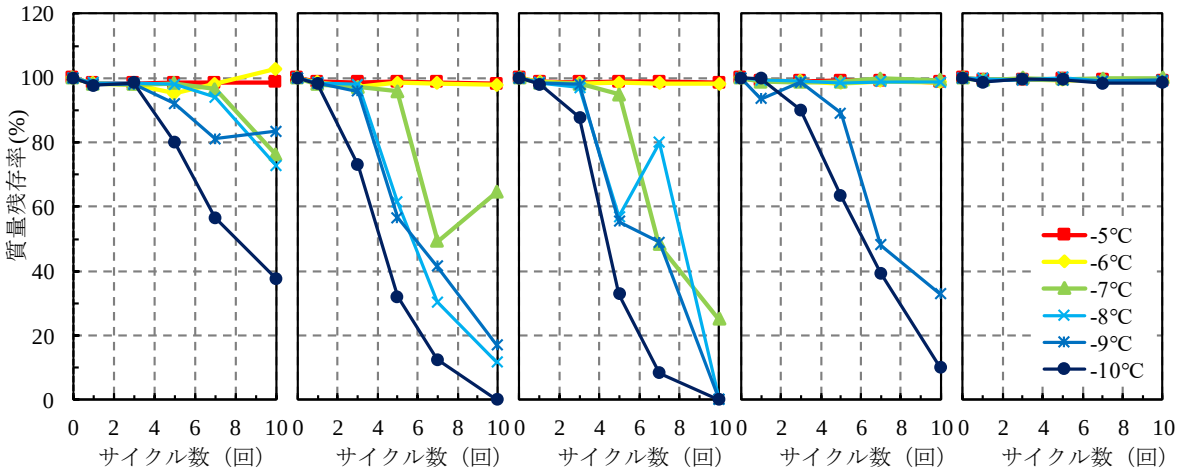
（本研究の場合　P=90，M＝10）

既往の研究 [6]ではスケーリング抵抗性の評価のため，SDI の基準の質量残存率を 60 %と設定しているものの，本研究ではスケーリング発生条件を定量的に示すため，これまでの筆者らの研究 [5]と同様に，質量残存率の基準を 90%とし，試験終了を予定しているサイクル数を 10 回とした。質量残存率 90%の試験片は軽微な剥離が見られる。なお，この小片凍結融解試験方法は，ASTM C 672 法など他のソルトスケーリング評価試験方法と比較検討した結果ある程度の整合性があり [6]，スケーリングを評



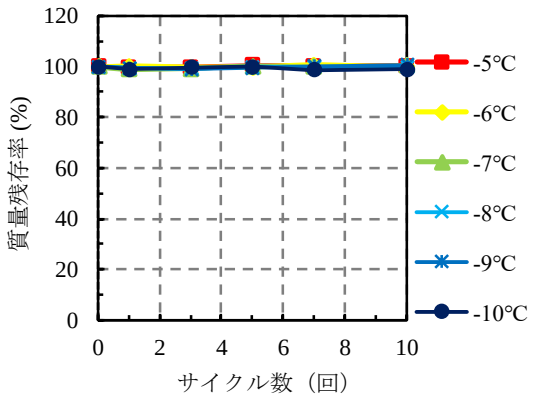
(1) KCl 0.1%　(2) KCl 0.5%　(3) KCl 1.0%　(4) KCl 3.0%　(5) KCl 6.0%

図－1　KCl 水溶液における質量残存率の推移

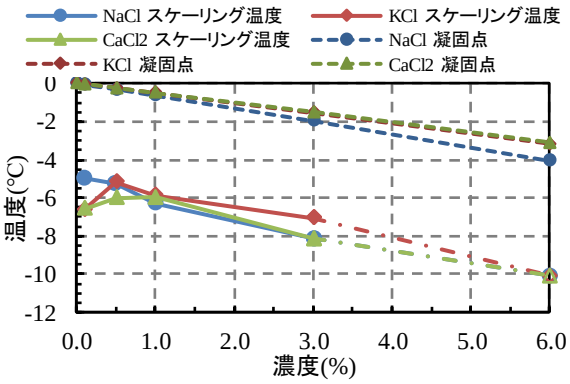


(1) $CaCl_2$ 0.1%　(2) $CaCl_2$ 0.5%　(3) $CaCl_2$ 1.0%　(4) $CaCl_2$ 3.0%　(5) $CaCl_2$ 6.0%

図－2　$CaCl_2$ 水溶液における質量残存率の推移



図－3　濃度 6.0%　NaCl 水溶液における質量残存率の推移



図－4　凍結防止剤水溶液の濃度とスケーリング温度

価する上では有効であることを確認している。

3. 実験結果

3.1 スケーリング抵抗性に及ぼす最低温度の影響

凍結融解サイクルに伴う質量残存率の推移を**図－1**, **図－2** および**図－3** に示す。KCl の場合，濃度 0.1%では最低温度が-7℃以下で，0.5%では最低温度が-6℃以下で，1.0%では最低温度が-7℃以下で，3.0%では最低温度が-8℃以下で，質量残存率が 90%以下となっている。$CaCl_2$ の場合，濃度 0.1%では最低温度が-7℃以下で，0.5%では最低温度が-7℃以下で，1.0%では最低温度が-7℃以下で，3.0%では最低温度が-9℃以下で，質量残存率が 90%以下となっている。水溶液の濃度が 6.0%の場合では，凍結防止剤の種類に関わらず，冷却時の最低温度が-10℃以上において質量残存率の低下が起こっていないため，この条件ではスケーリングが生じていないことが分かる。凍結融解サイクルに伴う質量残存率において，数値が増加するのは，小片凍結融解試験法が，ASTM C 672 のように 1 つの供試体を継続的に観察する試験ではないため，試験片によるばらつきによるものと推定する。

スケーリングが生じる条件では，最低温度が低くなるほど質量残存率の低下する傾向にある。スケーリングが発生する条件での KCl と $CaCl_2$ との凍結融解に伴う質量残存率の推移の差は小さいため，冷却時の最低気温が-10℃以上の範囲においては凍結防止剤溶液の種類の影響は小さいと考えられる。筆者らの研究[5)]の NaCl の結果によると，濃度 0.1%では最低温度が-5℃以下で，0.5%では最低温度が-6℃以下で，1.0%では最低温度が-7℃以下で，3.0%では最低温度が-8℃以下で，質量残存率が 90%以下となっている。

各凍結防止剤水溶液のスケーリングが生じる冷却時の最低温度と濃度との関係について定量的に示すため，質量残存率 90%を基準とするスケーリング耐久性指標（SDI）を用いて検討する。初めに，各凍結防止剤水溶液の濃度ごとに，各冷却最低温度について SDI を算出する。次に，各凍結防止剤水溶液の濃度ごとの各冷却最低温度の SDI より，SDI が 90 になる温度を算出し，この温度をスケーリング温度とした。スケーリング温度の計算例を示す。濃度 3%の KCl 水溶液の場合，各冷却時の最低温度の SDI は，-5℃で 99.2，-6℃で 99.5，-7℃で 91.8，-8℃で 68.0，-9℃で 36.4，-10 で 21.5 となる。これらの値より，SDI が 90 になる値を求めると-7.1℃となる。これらを各凍結防止剤水溶液の濃度ごとに行いスケーリング温度を求めた。凍結防止剤水溶液の濃度とスケーリング温度の関係を**図－4** に示す。各凍結防止剤水溶液の濃度 6%の結果については，-10℃と仮定している。加えて，各凍結防止剤水溶液の凝固点を点線で示している。また比較として，研究[5)]の NaCl の結果についても図示している。濃度が 0.1%程度の場合では，NaCl のみ-5，-6℃以上でスケーリングが生じてる。KCl は NaCl および $CaCl_2$ に比べてスケーリングが起こる温度が 1℃程度高い傾向がある。以上の試験結果より，凍結防止剤の種類が異なる場合でも，スケーリングが生じる冷却時の最低温度の条件は，凍結防止剤水溶液の濃度により定まることが分かった。凝固点よりもスケーリングが発生する温度が 5℃以上低い結果となった。凝固点よりもスケーリングが発生する温度が低いことは，スケーリングが生じる凍結防止剤の特徴であると考えられる。

4. スケーリング危険度マップの試作について

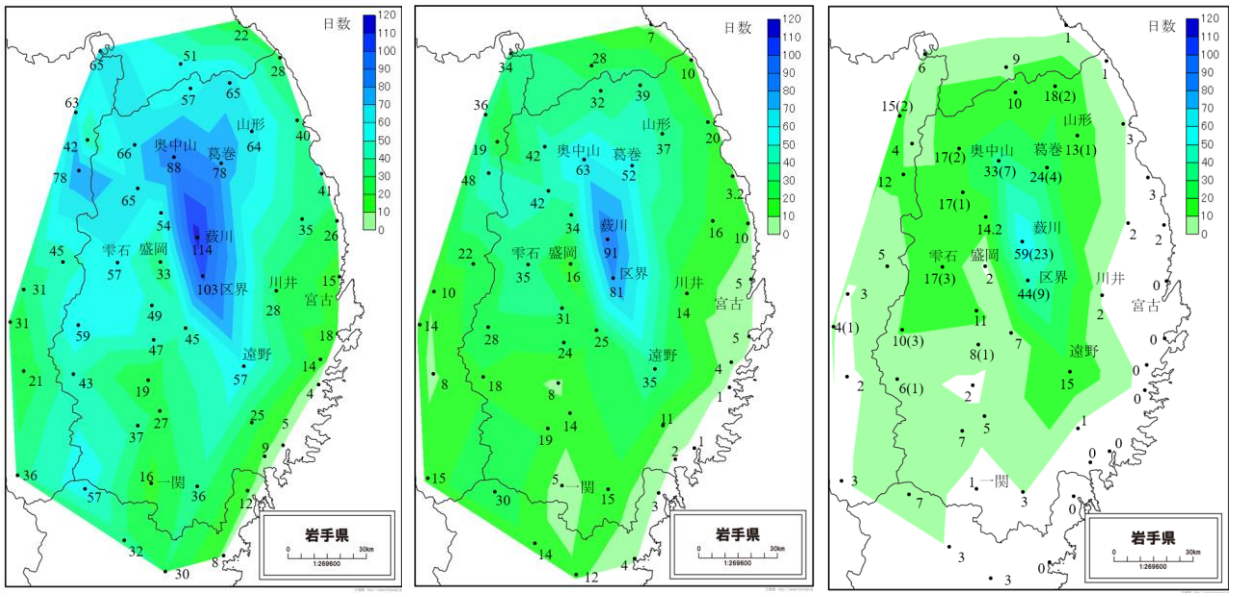
4.1 スケーリングの発生条件について

実験室レベルの促進試験であるが，既報の研究および本研究の試験結果より，-5℃以下の環境においてコンクリートのスケーリングが生じることが分かった。このことを念頭に置き，実構造物の供用環境下におけるスケーリングの危険度について評価する。既往の凍害危険マップでは，凍結防止剤の散布は考慮されておらず，凍結防止剤による凝固点降下の影響が含まれていない。そのた

め，凍結融解サイクルの適切な算出が可能か不明である。また，凝固点以下における降温と昇温がスケーリング抵抗性に与える影響に関する研究[7]によると，NaCl 水溶液が完全に融解しない条件下での降温と昇温の繰返しによりスケーリングが生じることが明らかになっている。このことから，自然環境下での凍結融解サイクル数および，その影響を定量的に評価するのは非常に困難であると考えられる。そこで本研究では，自然環境の簡便な評価方法として，1 日の最低気温に注目してスケーリング危険度の評価を行った。

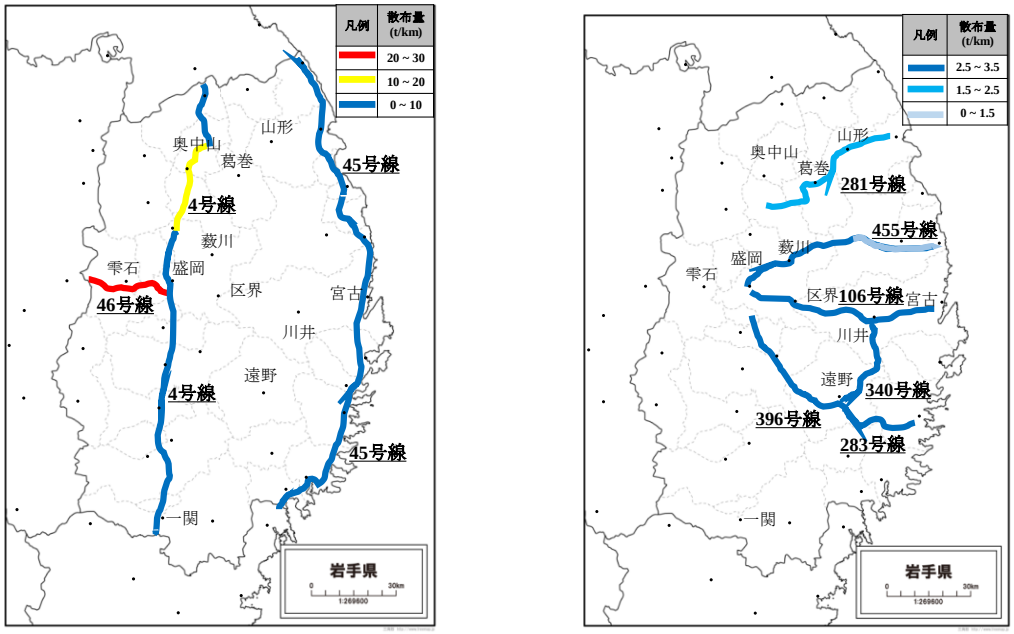
4.2 スケーリング危険度マップの試作

岩手県内の 1 日の最低気温データは，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）の観測データを引用している。岩手県全体を網羅するように分布している 36 の観測点のデータを引用している。1 日の最低気温が規定温度に達した日数のコンター図を作成するため，岩手県周辺の宮城県，秋田県および青森県のうち 16 の観測点についても同様にデータを引用した。奥羽山脈や北上高地といった標高が高い地域の観測点は，沿岸部や北上盆地の観測点に比べ，少なく，観測点間隔



(1) -5℃以下　　(2) -7℃以下　　(3) -10℃以下

図－5　岩手県の 1 冬期（10 月 1 日から翌年 5 月 31 日）における最低気温日数



(1) 国土交通省管轄　　(2) 岩手県管轄

図－6　岩手県における凍結防止剤溶液の散布量

が広くなっている。2013 年 10 月 1 日から 2018 年 5 月 31 日までの 5 年間の 1 日の最低気温のデータを使用した。

図－5 に 1 冬期（10 月 1 日から翌年 5 月 31 日）で-5, -7, -10℃以下となった日数の平均を示す。-10℃以下の日数データの括弧内数字は，-15℃以下になった日数を示しており，括弧がない観測点は，5 年間の平均において最低気温が-15℃以下になる日数がない地域を示している。沿岸および北上盆地南部を除く地域では，-5℃以下になる日数が 30 日以上となる。-10℃以下になるのは，北上高地，奥羽山脈および県北の内陸部であり，-15℃以下になるのは北上高地が主となる。-10℃以下日数が 59 日の薮川と 44 日の区界は，観測点の海面からの高さが 680m と 760m であり，薮川と区界に近接する盛岡は-10℃以下日数が 2 日で観測点の海面からの高さが 155m である。そのため，最低温度日数は観測点の海面からの高さに影響を受けている。

図－6 に岩手県における凍結防止剤の散布量を示す。凍結防止剤の散布量は，国土交通省東北地方整備局および岩手県庁から頂いたデータを使用している。国土交通省管轄の道路では，1km 当たりの凍結防止剤の散布量が 0～30t であるのに対して，岩手県管轄の道路では，0～3.5t と大きく異なる。交通量および車線数の影響があると考えられる。岩手県を縦断する国道 4 号線，盛岡から秋田までの 46 号線および宮古から盛岡までの 106 号線では散布量が 10t/km 以上と多い。また，県管轄の道路では，県内陸北部と人口の多い盛岡市内において比較的散布量が多い。一方，沿岸地域は平均気温が高いことと，降雪量が少ないため，散布量が少ない傾向にある。

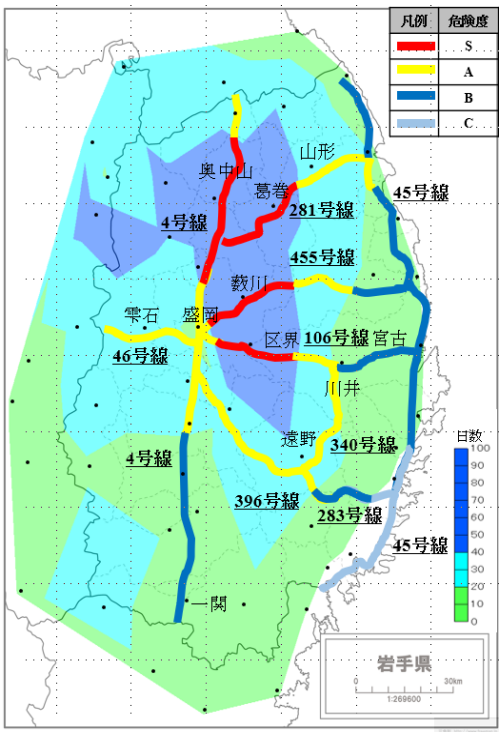
4.3 スケーリング危険度マップの試作

-7℃以下日数と凍結防止剤溶液の散布量からスケーリング危険度マップを試作する。-7℃以下の日数を温度条件の基準とするのは，凍結防止剤の散布量が小片凍結融解試験における凍結防止剤溶液の濃度に相当するか定かでない事と，濃度 1.0%以下において-7℃以下では著しく質量残率が低下することを考慮した事による。

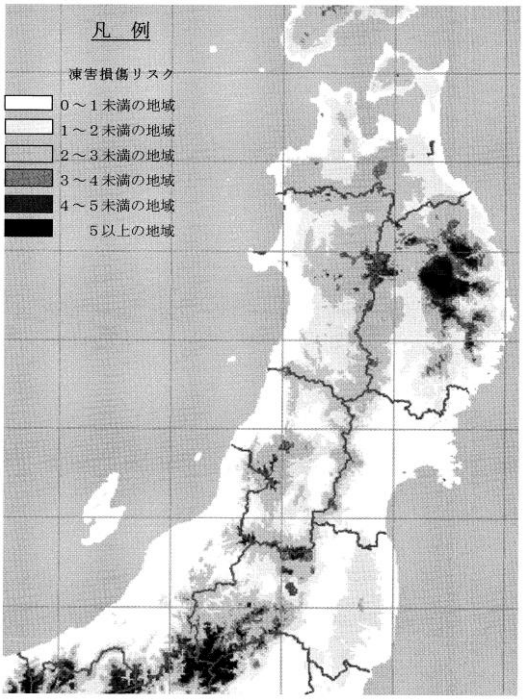
各道路におけるスケーリングの危険度を，「東北地方における凍害対策に関する参考資料（案）」[8]（国土交通省東北地方整備局）の凍害区分と凍結抑制剤散布量に基づく対策の種別を参考に，-7℃以下の日数を 0～20，20～40 および 40 以上の 3 段階に分け，凍結防止剤の散布量を 0～10，10～20 および 20～30t/km の 3 段階に分け，S,A,B および C の 4 つのランクに分類した。スケーリング危険度の基準は，-7℃以下の日数による凍結融解回数を主な因子と考え凍結防止剤の散布量を副因子と考えてランク分けした。その分類結果を**表－1** に示す。この結果を基に作成した各道路のスケーリング危険度マップを

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	10～20	20～30
-7℃以下日数	0～20	C	B	B
	20～40	A	A	A
	40 以上	S	S	S



図－7　スケーリング危険度マップ



図－8　凍害損傷リスクマップ [2]

図－7 に示す。国道 4 号線県北の区間では，-7℃以下の日数が 60 日以上かつ凍結防止剤の散布量が 10t/km 以上とスケーリングの危険度が高いと考えられる。一方，国道 4 号線の県南区間は，A ランクであるものの，-7℃以下の日数が 20 日未満の箇所が多く, 区間によってはスケーリングの危険度は低いと考えられる。国道 46 号線の盛岡から雫石の地域では-7℃以下の日数が 35 日程度であるものの, 凍結防止剤の散布量が 20t/km とスケーリングの危険度が高いと考えられる。岩手県管轄の道路では，薮川, 区界および葛巻では-7℃以下の日数が 40 日以上であり，最高気温が 0℃以下の日数が薮川で 68 日，区界で 75 日，葛巻で 44 日と完全に融解する日数は少ない。しかし，-7℃を通過するような降温と昇温の回数が多いため，スケーリング発生の危険度が高いと考えられる。

東日本大震災発生により新設された三陸沿岸復興道路は, -7℃以下の日数が 20 日未満の地点が多く凍結防止剤の散布量が少ないと想定されるため，凍結防止剤散布によるスケーリングの危険性は低いと考えられる。

4.4 既往の凍害危険度マップとの比較

試作したスケーリング危険度マップの適用性を評価するため, 既往の凍害危険度マップおよび,「東北地方における凍害対策に関する参考資料（案）」[8)]（国土交通省東北地方整備局）の凍害区分と凍結抑制剤散布量に基づく対策の種別と比較する。既往の凍害損傷リスクマップ [2)] を**図－8** に示す。区界地域などの北上山地および雫石における地域につついては，凍害危険度マップおよびスケーリング危険度マップともに危険性が高いことを示している。一方，盛岡の北側の国道 4 号線については，凍害危険度マップは危険度が低いと見積もっているが，スケーリング発危険度マップは危険度が高いと評価しており，スケーリングの危険性が懸念される。

本研究で試作したスケーリング危険度マップは，スケーリング危険度について定性的な評価にとどまっている。そのため，スケーリングが発生する地域におけるコンクリート構造物の耐久性向上には，スケーリング危険度の適切な評価が必要であると考えられる。そのため今後は，構造物の健全度評価，小片凍結融解試験をはじめとする促進試験と実環境との相関性の評価などにより，温度，凍結防止剤の散布量，降雪量等の環境因子を適切に評価する必要があると考える。

5. まとめ

スケーリングの発生条件を一般化させるため，NaCl と異なる凍結防止剤について，冷却最低温度が-5~-10℃の温度域において，最低温度と凍結防止剤水溶液の濃度との関係がスケーリングに与える影響について検討した。また，得られたスケーリングの発生条件を参考に，1 日の最低温度および凍結防止剤の散布量データを基に岩手県におけるスケーリングの発生危険度マップの試作を行った。得られた結果を以下に示す。

(1) KCl および $CaCl_2$ ともに，NaCl の既報の研究結果と同様に，濃度によってスケーリングが発生する温度が異なった。濃度によってスケーリングが発生する温度の閾値が存在することが分かった。この閾値は凍結防止剤の種類に関わらないと考えられる。

(2) 1 冬期（10 月 1 日から翌年 5 月 31 日）で-7℃以下となった日数と凍結防止剤の散布量より試作されたスケーリング危険度マップは，既存の凍害危険度マップとある程度一致する結果となった。また，スケーリング危険度マップより国道 4 号線の県北地域においてスケーリングの危険度が高いことを示した。

参考文献

1) 長谷川寿夫：コンクリートの凍害危険度算出と水セメント比限界値の提案，セメント技術年報 XXIX，pp.248-253，1975

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，No1，pp.29-38，2008.1

3) 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

4) 羽原俊祐，小山田哲也，我満俊文，中村大樹：ソルトスケーリングにおよぼす冷却最低温度と凍結防止剤濃度およびモルタル配合の影響，セメント・コンクリート論文集，Vol. 69，pp. 433-439 ，2015

5) 田中舘悠登，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

6) 菅野華果，羽原俊祐，小山田哲也，越後貴司：既存スケーリング試験方法に対する小片凍結融解試験方法の整合性，セメント・コンクリート論文集，Vol.68，pp.419-425，2014

7) 田中舘悠登，羽原俊祐：低温下における降温と昇温の繰り返しがモルタルのソルトスケーリング抵抗性に及ぼす影響, セメント技術大会講演要旨, Vol.72, pp.234-235, 2018

8) 東北地方における凍害対策に関する参考資料（案）国土交通省　東北地方整備局，2017