



地域と歩む防災研究センター



Research Center for Strategic Assistance in the Prevention of Floods, Earthquakes and Regional Hazards

# SAFE Report

2025.3 Vol.5

地域と歩む防災研究センター

# R & D



昨年1月に被災した能登半島地域は、9月には大規模な洪水災害の発生と、まさに複合災害となってしまいました。今回の度重なる災害から、一日も早い復旧・復興を願うばかりです。昨年度の報告書にも書きましたとおり、積雪寒冷地に住む私たちとしては、この度の災害をしっかり受けとめ、次の災害に向けて一層の備えをする必要があります。特に今回の被災に関してクローズアップされていることは、災害関連死への対策です。本年1月末の調査では、災害による死者数520数名の内、その約半数以上の300人を超える方が災害関連死となっている現状を見るに、避難所における生活の質の向上が大きな課題であることに疑問を挟む余地はありません。本センターでも、スフィア基準や受援力強化などの積雪寒冷地における避難所に関する研究をはじめとし、広く積雪寒冷地における防災・減災について研究を一層推進すべきと考えております。

また、2025年1月には、本センターと札幌市建設局との主催による「来たるべき北海道での複合災害を考えるシンポジウム」を開催いたしました(下写真)。シンポジウムでは、これまでの連携協定のもと実施された貴重な成果が発表されました。これまでご協力頂いた札幌市建設局の皆様には心より感謝申し上げます。さらに、会場との討論では、人口減の中、防災・減災における自助・共助・公助をどのように維持すべきかについて議論され、町内会としての対応が重要であること、また、今後は企業との連携も必要になる、との指摘がなされ、防災・減災における幅広いステークホルダーと連携する重要性を改めて認識した次第です。

本研究センターは「防災」、「寒冷地」というキーワードで、学内の防災関連研究のリソースを一元化し、地域にその研究成果を還元したいとの目的で活動を行ってまいりました。防災・減災においてはより多くの関係機関を連携し、総力戦で立ち向かうことが必要であると、能登半島の災害や今回実施しましたシンポジウムで改めて感じております。是非これからも、皆様と課題や教訓を共有できればと考えております。

最後になりましたが、今年度も研究成果を皆様と共有するため、「SAFER R&D Report Vol.5」を発刊する運びとなりました。ご高覧頂ければ幸いです(カラー版はSAFER web ページ <https://kit-safer.com/publication/> に掲載予定です)。

今後とも関係の皆様からの変わらぬご指導とご助言を賜りますよう、宜しくお願い申し上げます。

2025年3月



写真：来たるべき北海道での複合災害を考えるシンポジウム

【表紙の写真】 UAVを用いた河川堤防点検 撮影者：白井 秀和

地域協働防災研究部門

- ◆ダクトヒータ温風流れの模型実験の検討  
林田 和宏・稲葉 一輝 ..... 2
- ◆電動車の機動性を活かした厳冬期における避難所への給配電の可能性に関する研究  
高橋 清 ..... 4
- ◆災害時のパニック管理と冷静な意思決定支援に向けた感情分析システムの拡張  
プタシンスキ ミハウ・WANG LU・榊井 文人 ..... 6

インフラ耐災技術研究部門

- ◆深層学習モデルU-netを活用したドローン画像解析による堤防変状(亀裂)の検知  
白井 秀和・岩館 健司・渡邊 康玄 ..... 8
- ◆情報理論に基づくオホーツク地方の年間降水量パターン変動の解明  
あるさわふ もはまどぼせる ..... 10
- ◆アイスジャムによる水深上昇の推定手法の実河川への適用とアイスジャム現象解明のための水理実験  
吉川 泰弘 ..... 12
- ◆下路桁橋における積雪形成と部材応答の関係  
門田 峰典・白川 龍生 ..... 14
- ◆寒中における補修施工の効率性向上に資する耐寒補修材料および施工方法の開発  
崔 希燮・井上 真澄 ..... 16
- ◆亜硝酸リチウムと亜硝酸カルシウムを混合使用した耐寒PCグラウトの開発  
井上 真澄・崔 希燮 ..... 18
- ◆加速度計測に基づくコンクリート床版の効率的な維持管理手法の検討  
門田 峰典 ..... 20
- ◆一軸引張を受ける金属パテ材補修鋼板の性能に関する実験的検討  
門田 峰典・伊藤 潤 ..... 22
- ◆横断歩道橋における階段部の耐荷性能の把握(その2)  
門田 峰典・岩本 彩伽 ..... 24
- ◆凍上による太陽光電池アレイ用鋼製架台の部材応答  
中村 大・門田 峰典 ..... 26
- ◆凍上を模擬した太陽光電池アレイ用鋼製架台のジャッキアップ実験  
中村 大・門田 峰典 ..... 28
- ◆スパイラル杭の引抜き時における地盤挙動のX線CTスキャンによる可視化  
中村 大・門田 峰典 ..... 30
- ◆土の含水比変化がスパイラル杭の引抜き抵抗に及ぼす影響の解明  
中村 大・門田 峰典 ..... 32
- ◆凍結融解履歴が岩盤斜面の安定性に及ぼす影響の解明  
中村 大 ..... 34
- ◆緑化植物の生育状況が植生工の侵食防止効果に与える影響  
中村 大 ..... 36
- ◆衛星データ時系列解析と機械学習によるモンゴル・ウランバートル周辺のアイシングと地盤変状危険箇所の抽出  
渡邊 達也 ..... 38

突発災害調査研究部門

- ◆北海道の豪雪地における1月の積雪堆積環境調査  
白川 龍生・門田 峰典・鈴木 颯真 ..... 40
- ◆記録的大雪に見舞われた2025年2月帯広における積雪調査  
白川 龍生 ..... 42
- ◆北海道太平洋沿岸地域における津波避難可能性の傾向分析  
齊藤 剛彦 ..... 44

# ダクトヒータ温風流れの模型実験の検討



教授 林田 和宏      助教 稲葉 一輝

## Highlights

- ダクトヒータのビニールダクト内を流れる温風の模型実験について検討を行いました。
- ダクトヒータ実機とダクトヒータ模型の温度データは比較的一致しており、簡易な模型実験によりダクトヒータの効率的な温風送気方法の検討が期待できます。

冬場に停電を伴う大規模な災害が発生した場合、寒さから体調を崩す人が少なくありません。避難所では電気を使用する暖房器具は使用できなくなるか、あるいは非常用発電機を用い省電力で暖房器具を動かす必要があるため、暖房器具の使用は限定的となります。電気を使用しない石油ストーブは有効な暖房器具ですが、燃焼排ガスが室内に直接排気されるので、避難所屋内の換気に注意を払う必要があります。また、換気をするとせっかく暖まった室内が寒くなってしまふ課題があります。

避難所での使用が想定される暖房器具の一つに「ダクトヒータ」があります。ダクトヒータはヒータ本体にビニールダクトを取り付けることで、ヒータ本体で発生する温風を離れた場所に送気する暖房器具です。ダクトヒータは屋外に設置するか、排気口から出る燃焼ガスを屋外に排気することで、避難所の空気環境の汚染を避けることができ、かつ消費電力が比較的少ないため、災害時に有効な暖房器具と言えます。

ダクトヒータの燃料には灯油が使用されますが、地震による被害で道路網が寸断されてしまうと外部からの燃料供給が途絶えてしまうため、ダクトヒータを効率的に運用する必要があります。しかしながら、ダクトヒータとビニールダクト(図1参照)は大きなものであるため、実機を用いて実験的に効率的な運用方法を検討することは困難です。そこで、実機をスケールダウンした模型実験ができないか検討を行いました。

実機と模型で得られる現象が物理的に相似していれば、模型



図1：ダクトヒータとビニールダクト

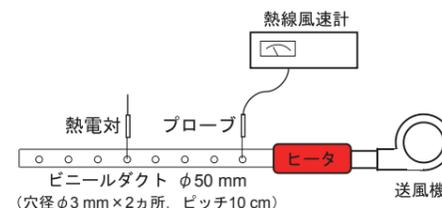
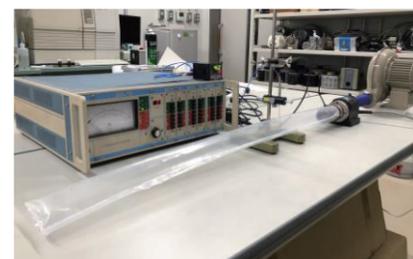


図2：ダクトヒータ模型の写真と概略

実験を行うことが可能になります。そこで、ビニールダクト内を流れる温風について、実機と模型のレイノルズ数を一致させることによるスケールモデリングを試みました。図2にダクトヒータ模型の写真と概略を示します。送風機の空気流を電気ヒータで加熱し、ビニールダクトに温風を送気します。ビニールダクトの直径はφ50mmであり、ダクト側面にはφ3mmの穴が2カ所、ピッチ100mmの等間隔で開いています。これは、実機のビニールダクトの直径φ450mm、穴径30mm、ピッチ1000mmをおよそ1/10に縮小させたものになっています。

実機ダクトヒータで測定した、ある箇所における温度(53℃)と風速(1.2m/s)からレイノルズ数 $Re$ を求めると、

$$Re = \frac{u_a D_a}{\nu} = \frac{1.2 \cdot 0.45}{(18.49 \times 10^{-6})} \approx 29205$$

となります。ここで、 $u_a$ は風速、 $D_a$ はダクト径、 $\nu$ は53℃における空気動粘性係数( $18.49 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ )です。このレイノルズ数と一致する模型ダクト内の風速を求めると、

$$u_m = \frac{\nu Re}{D_m} = \frac{(18.49 \times 10^{-6}) \cdot 29205}{0.050} \approx 10.8 \text{ m/s}$$

となります。ここで、 $u_m$ は模型のヒータ出口における風速、 $D_m$ は模型のビニールダクト径です。

模型ヒータ出口の温度を53℃、風速を10.8m/sに設定し、ビニールダクト内を流れる温風の温度変化を熱電対で測定し、実機ダクトヒータと比較した結果を図3に示します。なお、風速は熱線風速計を用いて測定し、ヒータ入口のバルブで風量調整を行っています。下流側で温度差が見られますが、これはダクト外側の温度の違いが影響していると考えられます。実機のデータは昨年度実施された北見市の冬季避難所開設運営訓練で得たもので、この時の室内温度は14℃でした。一方、模型のデータは室内温度20℃の条件で得られたものであるため、ダクト内からの放熱量が少なかったことが影響していると考えています。

模型実験の有効性が確認できたので、今後は模型実験および昨年度構築した数値シミュレーションの手法を併用することで、ダクトヒータの効率的な温風送気方法について検討していきたいと考えています。

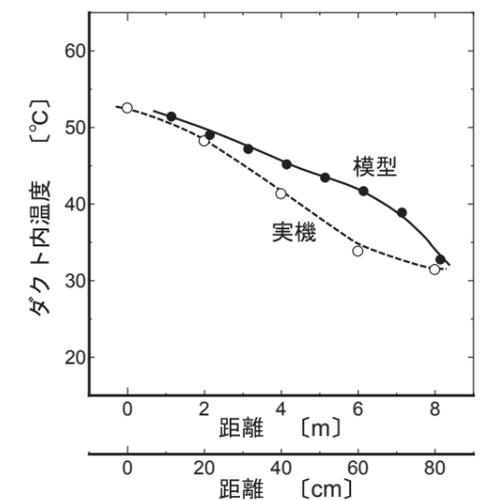


図3：実機と模型の温風温度の比較

# 電動車の機動性を活かした厳冬期における避難所への給配電の可能性に関する研究



センター長・教授  
高橋 清

## Highlights

- 電動車の「機動性(動く発電機)」を活用方法について、ポータブル電源の充電と公共施設への配送、及び、道の駅トイレへの給電等について検討を行いました。
- 道の駅においてはPHEVからポータブル電源へ40分で給電し、照明や暖房があるトイレ環境を一晩維持することが可能であることがわかりました。

2024年1月に発生した能登半島地震では、災害関連死への対策が課題とされています。北海道においては本州と比較し厳冬期間が長く、避難所の寒さ対策をはじめとする避難所の対策は喫緊の課題です。その中でも電力は、暖房や暖かい食事の提供だけでなく、照明や通信・医療機器の利用等、避難所での生活と安全、QOL (Quality of Life) の向上を支えるために必要不可欠です。そこで、本研究では、電動車の機動性(動く発電機)の活用可能性について、「PHEVでポータブル電源を施設等へ配送」、「PHEVからポータブル電源への給電」、「配送されたポータブル電源で道の駅トイレへの給電」の実験を行いました。給配電の実験には、斜里町ウトロ地区自治会が所有する三菱アウトランダー(バッテリー(容量20kWh、ガソリン容量56L))を使用しました。給配電のイメージと実際の給電の様子は、図1、写真1のとおりです。

PHEVでポータブル電源を施設等へ配送実験では、地元自治会に対する事前の聞き取り調査を基に、配送が想定される合計5施設と、1周4.4kmのルートを設定しました。また、PHEVの走行は、a) チャージモード(走行中停車中問わず、エンジン発電で駆動用バッテリーを満充電近くまで充電するモード)と、b) ノーマルモード(バッテリーからの電力とエンジン発電による電力をバランスよく使用しながら

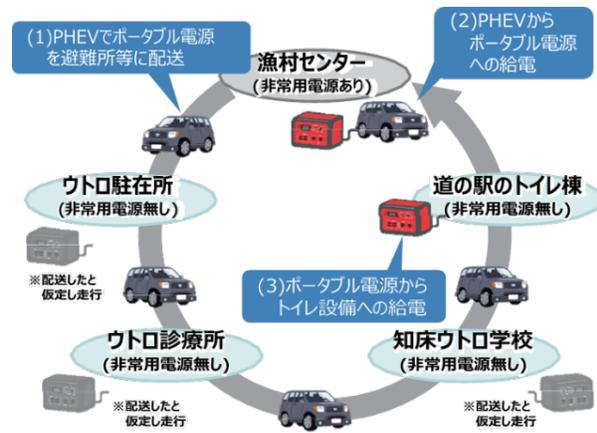


図1： PHEV とポータブル電源による給配電イメージ



写真1： PHEV からポータブル電源への給電の様子

走行するモード)で走行し、走行モードによる違いを比較しました。走行モード毎に実験終了後の給油量を確認し、走行燃費を計算した結果、チャージモードでは、走行燃費は7km /L、ノーマルモードでは、走行燃費は23km /Lとなりました。ノーマルモードのバッテリー消費量に着目すると、PHEVによる公共施設への配送では44kmの走行で車載バッテリー40%の残存を確認しました(図2、図3)。その結果、チャージモードでは、ガソリンスタンドが営業等車両への給油が可能な場合や、PHEVバッテリーから多くの給電が必要な場合に有効であり、ノーマルモードでは、ガソリンスタンドで給油が不可能な場合や、ガソリン消費を抑えたい場合に使用することが有効であるとの結果となりました。

さらに、ポータブル電源で道の駅トイレ棟の設備への給電では、非常用電源の設備がない道の駅「うとろ・シリエトク」のトイレ棟において、ポータブル電源による仮設照明やトイレ機器、暖房機器等への給電を実施しました。道の駅トイレへの給電は、仮設照明やトイレ機器、暖房機器について2時間半を行い、ポータブル電源のバッテリーの38%の消費を確認しました。バッテリー100%から0%になるまで時間に換算すると、約7時間給電可能であることが試算されました。以上の実験より、ポータブル電源1台で、照明や暖房があるトイレ環境を一晩維持することが可能です。また、PHEVからポータブル電源への給電が、40分で満充電となっていることから、ポータブル電源2台の使用と充電を切り替えることで、道の駅トイレへの給電を常時することが可能であることが明らかとなりました。今後は、さらなる防災拠点(診療所や駐在所)への電源供給や、漁村センターや知床ウトロ学校等、避難所の入口照明等や避難者等への携帯充電等のサービス活用に関する実験を検討しています。

本実験は、当センター、網走開発建設部、(株)ドーコンのメンバーにより実施されました。また、ウトロ地域の皆様にもご協力頂きました。ここに記して感謝いたします。

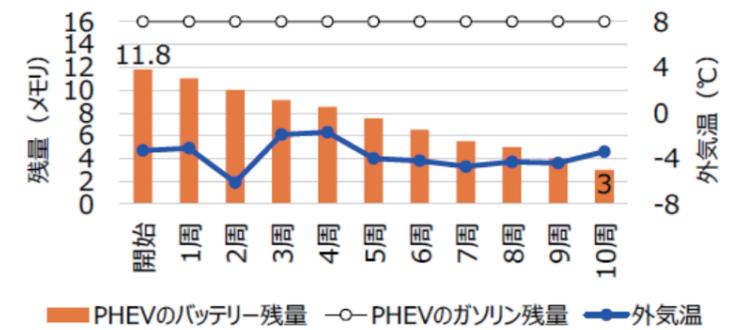


図2： チャージモードでのバッテリーとガソリン残量

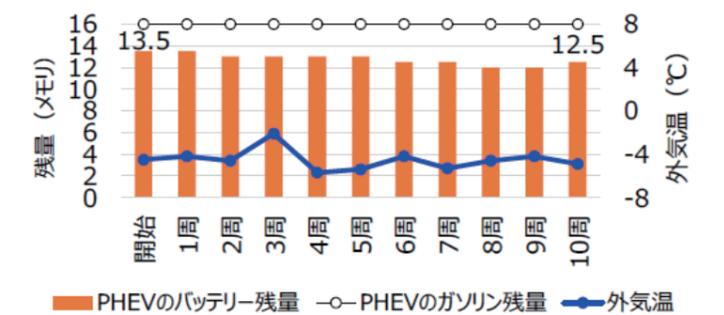


図3： ノーマルモードでのバッテリーとガソリン残量

# 災害時のパニック管理と 冷静な意思決定支援に向けた 感情分析システムの拡張



准教授  
Ptaszynski ミハウ



研究補佐・博士課程1年  
WANG LU



教授  
梶井 文人

## Highlights

- 日本語用感情分析システムを、感情表現辞書の追加と感情表現の自動抽出により拡張しました。
- 手動辞書統合と自動語彙更新を組み合わせという2種類の手法を提案し、感情表現の辞書ベースを2倍程に拡張し更新できました。
- 更新された感情分析システムにより、計算負荷と処理時間を増やすことなく、SNS上のユーザの感情状態の検出精度が向上しました。
- 今後、災害時のパニック管理と冷静な意思決定を促進するシステムにさらに実装される予定です。

### 1. はじめに

SNS（ソーシャルネットワークサービス）の普及は、個人が災害を含む様々な事象に対する感情や反応を表現するコミュニケーション手段として使われるようになっていきました。これらの人の気持ちに関する表現を体系的にリアルタイムで分析されれば、災害時に個人が表す心配、不安、恐怖などを即時に分析することができれば、パニック現象が広がることを予測する可能性があります。パニックの拡大を早期発見できれば、冷静さを保ち合理的意思決定を支援するシステムの開発に貴重な情報源となります。感情情報の自動抽出・分析研究はSNSの成長とともに発展してきたが、大規模データの分析によく使われる日本語テキスト感情分析システムML-Ask [1]は1990年代の文学表現を含む辞典に依存しており、現代的なインターネット表現が不足しています。この制限は、リアルタイムの災害対応システムにとって重大な課題となっています。

感情分析手法には、辞書ベース、ルールベース、機械学習の三種があるが、それぞれに長短所があります。辞書・ルールベースは大規模データの迅速分析に適しているが新表現への対応に弱く、機械学習は精度が高い反面、リソースを多く必要とし複雑な感情状態の表現に苦勞します。この点は感情が複雑に変動する災害関連コミュニケーションでは特に懸念されます。

ML-Askの制限に対処するため、我々はまず口語的表現を含む「日英対照感情表現辞典」[2]と「Love, Hate and Everything in Between」[3]という日常的表現を含む二つの補完的辞書を特定しました。災害関連コミュニケーションでは文学的表現より口語的表現が一般的であるため、これらの統合は不可欠でした。

さらに、本研究は災害対応に向けた感情分析の性能向上を目的に行なっているため、辞書によって異なる感情カテゴリーを統合する方法論と、各感情カテゴリー定期の辞書（感情表現のリスト）の拡張を行うための自動化手法を提案しました。これにより、災害時のパニックや不安を検出し、より効果的な支援を提供することが可能であるパーソナルアシスタントの開発を目的としています。

### 2. 方法

#### 2.1 手動辞書拡張

まず、ML-Ask感情分析システムの感情辞書を、[2]と[3]という二つの既存の感情表現辞典を統合することで拡張しました。これらの辞書間にはカテゴリ体系の相違があり、[2]は8つの感情カテゴリー、ML-Askの既存の辞書は10カテゴリーを採用している点で調整を要した。分析の結果、カテゴリー間で重複が見られ、パニック検出に関

係する感情カテゴリーとしては、苦しみ（50%）、驚き（40%）、悲しみ（40%）の表現で高い一致率を示した。しかし、恐怖に関する一致率は少なく、表現の相当数（32.88%～83.85%）がML-Askに存在しない語彙外（OOV）表現も多数ありました。これらのOOV表現を適切に分類するため、文脈的な用例を収集し、日本人母語話者を対象にアンケート調査を実施し、感情的意味が曖昧な表現の曖昧性解消できました。

この拡張により、災害管理における感情分析システムにはパニック関連の感情状態を表す表現、特に苦しみ、恐れ、苦悩の表現に対する検出能力が向上した。また、安心や喜びなどのポジティブな感情分析も性能向上され、災害対応全体を通じた感情的回復の追跡も可能となりました。

#### 2.2 自動辞書拡張

次に、大規模テキストコーパスから感情表現を自動抽出する方法を提案しました。まず、テキストの形態素解析を行いました。高頻度用語内の感情表現を調査し、既存の感情辞書内の形態的パターンの分析により、非感情表現を自動的にフィルタリングする方法を確立しました。分析の結果、感情表現には助詞、助動詞などが欠いているという重要な発見があり、これにより候補単語の効率的な絞り込みが可能となりました。2種類の表現分割プロセス（単語分割、チャンク分割）と2種類の重み付け手法（tfidf・OkapiBM25）を比較評価した結果、OkapiBM25を用いたチャンク処理が最も優れており、ML-Askに含まれていなかった新しい感情表現を識別することに成功した。

この自動拡張により、災害時に急速に進化するインターネットの感情的言語に適応することが可能となり、システムは変化するコミュニケーションパターンに対応しながら、パニック状態の効果的な分析能力を維持できるようになりました。

### 3. 実験と結果

実験では、複数辞書の統合と感情表現の自動抽出による感情分析システムの性能評価を行いました。評価には先行研究から収集した280の感情的・非感情的文を用いました。第一実験では、[2]（約1100表現）と[3]（約365表現）のカバレッジを評価した結果、ベースライン辞書（約2620表現）の部分一致率66%に対し、それぞれ19%と1%と著しく低いことが判明した。第二実験では両辞書をML-Ask感情辞書と統合した結果、部分一致の正解率は68%（+2%）、感情の活性化次元の正解率は59%（+1%）と緩やかに向上したが、完全一致率は40%（-4%）に減少した。不正確抽出率が3%と変化しなかったことは、偽陽性なしの統合成功を示しています。

第三実験では6つの自動拡張手法を検証し、部分一致率（最大+10%）、極性・活性化次元一致率（+9%、+12%）の大幅改善が見られたが、完全一致率の低下（平均-17.5%）と不正確抽出率の上昇（平均+3.5%）も確認されました。第四実験では、自動抽出表現の手動フィルタリングを実装したところ、部分一致率の改善を維持しつつ、完全一致率の減少を平均-1.7%に抑制し、不正確抽出率をベースライン水準（2%）に維持できました。OkapiBM25重み付けを用いたチャンク処理が最も効果的でした。

### 4. 結論と将来の研究

本研究では、複数辞書の統合と感情表現の自動抽出により、感情分析システムの辞書ベースを1.5以上に（2620→4085）拡張することができ、感情分析システムの性能評価を行いました。その結果、辞書拡張されたシステムは新しい感情表現に対応できるようになり、カバレッジも性能も向上しました。

これらの知見は災害管理パーソナルアシスタントに重要な意義を持ちます。拡張された感情辞書により、様々な表現形式でのパニックや恐怖の検出能力が向上し、特に非標準的表現が頻出する高ストレス状況での感情分析が改善されます。また、手動フィルタリングを伴う自動抽出手法は、災害時のリアルタイム適応を可能にし、より適切な感情調整と冷静な意思決定支援に貢献することを可能にします。

#### 参考文献

1. Ptaszynski, M., Dybala, P., Rzepka, R., Araki, K., & Masui, F. (2017). ML-Ask: Open-source affect analysis software for textual input in Japanese. *Journal of Open Research Software*, 5 (1).
2. 稗島一郎. (1995). 日英対照感情表現辞典.
3. Murakami, M. (1997). Love, hate and everything in between: expressing emotions in Japanese.

# 深層学習モデルU-netを活用したドローン画像解析による堤防変状(亀裂)の検知



部門長・准教授  
白井 秀和



助教  
岩館 健司



アドバイザー・教授  
渡邊 康玄

## Highlights

■ 従来、現地で行われる河川の堤防診断に関して、ドローン画像を用いたAIによる診断手法について検討しました。現地調査で確認される堤防の亀裂について、高度30mからの撮影した画像で幅1cm程度の亀裂が検知できることが確認できました。

河川管理を適切に行うためには、定期的な堤防の変状診断が不可欠です。この堤防診断は、現地で調査員が各変状項目(亀裂、裸地化、排水不良等)に該当するかを目視で確認し、記録する形で行われます(図1)。しかし、広範囲を網羅することは難しく、調査員ごとの差異や、労力の負担といった課題があります。このため、ドローンにより俯瞰的な画像データを取得し、AIによる自動診断を導入することで、より効率的かつ高精度な堤防変状の検知が可能となることが期待されています。このことから、我々は、ドローン撮影画像を用いて、堤防変状を検知できるAIの構築を目指しています。

本研究では、既往の研究データであるドローンによる撮影画像を用いて、堤防変状項目の中で亀裂に焦点を当てたAIの構築を行い、データ数の影響や異なる変状項目での違いについて検討しました。

AIを構築するための画像は、月寒川(北海道札幌市豊平区)を対象にドローンで撮影した映像(既往研究より取得)を切り出して用いました。この画像は、DJI Mavic 2(図2)により高度30mから撮影したものになります。この画像に対して亀裂画像を抽出し、ラベリングを行いました。

AIモデルは、領域抽出として代表的な手法である深層学習モデルU-netを用いました(図3)。学習するうえで、亀裂画像85枚を用いた場合と139枚を用いた場合で検討しました。図4は、実際に用いた入力



図1：現地での堤防診断の様子

画像と亀裂の正解画像の例を示しています。亀裂画像85枚を用いた解析結果を図5、139枚を用いた場合の解析結果を図6に示しています。これらの図から学習データを増やすことでより細かい亀裂が検知できるようになることが確認できました。また、AIで検知できた亀裂は、実際の現地で計測された亀裂幅1cm程度のものであることが確認されました。

今後は、異なる条件や変状項目も含めた検討を行っていく予定です。



図2：用いたドローン

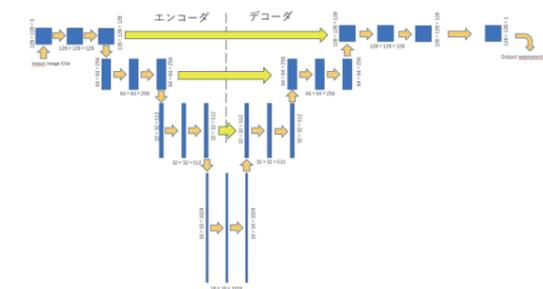


図3：U-netの概要図



図4：堤防点検によって確認された変状(左：入力画像、右：正解画像)

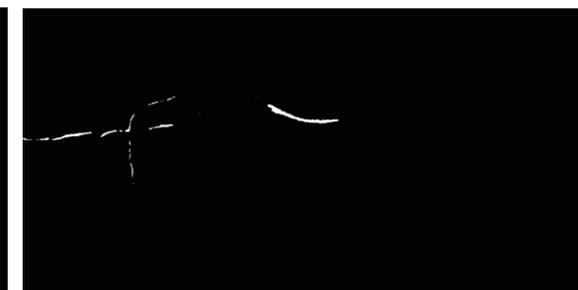


図5：亀裂画像85枚で検討した場合の解析結果(左：結果画像、右：検出閾値0.5以上)



図6：亀裂画像139枚で検討した場合の解析結果(左：結果画像、右：検出閾値0.5以上)

# 情報理論に基づくオホーツク地方の年間降水量パターン変動の解明



助教  
あるさわふ もはまどばせる  
(R6.9まで在籍)

## Highlights

- 1988年から2002年にかけて、特に9月に集中豪雨が発生した記録がありました。
- 2012年以降、強度が低くなった8月への回帰傾向が見られました。

北海道オホーツク地方は、全国で最も降水量が少なく、長く厳しい寒い冬と比較的短い温暖な夏を経験しています。にもかかわらず、オホーツク地方では過去に大規模な洪水被害が発生しています。現在の地球規模の気候変動を踏まえ、この地域の年降水量変動と関連する洪水リスクに関する総合的なイメージを提供することが重要です。近年、環境および水文研究において、情報および複雑性に基づくアプローチは、動的データセットに埋め込まれたパターンを明らかにする有効的な方法論として注目を集めています。そこで、本研究では、情報および複雑性に基づく手法を用いて、北海道東部の年降水量記録の変動を調査することを目的とします。

提案モデルは、長期的な記録をデジタルシステム、つまりコンピュータシステムと同様の1と0の2進数システムにエンコードおよびデコードすることに依存しています。この新しいアプローチは、機械的な視点から、つまり重要な(1)または重要でない(0)の状態のみに基づいて、流域内および流域上の水文プロセスを定義する隠れたパターンを明らかにし、意味のない期間(イベント)を排除します。図1は、北見ステーションで行われた例を示しています。

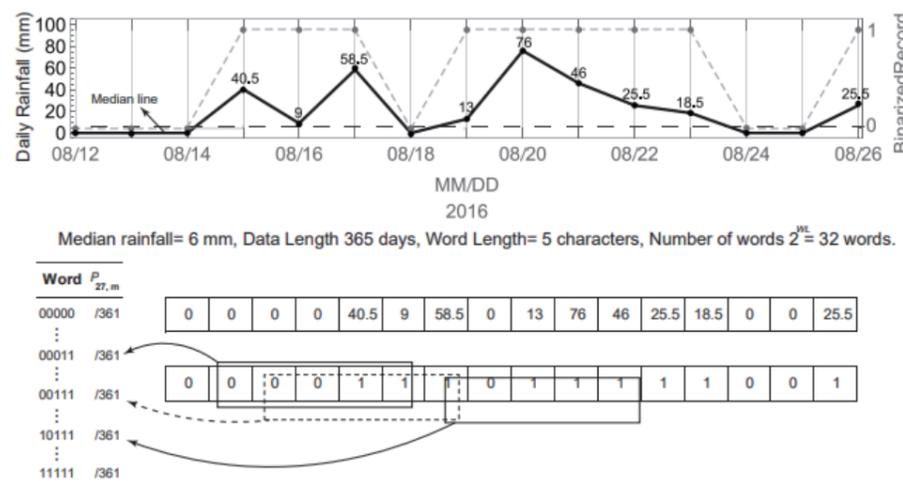


図1：北見観測所における降水記録に対するブル変換法の実施結果の可視化

図2aは、各調査局で記録された年間降水量の総値の時系列を示しています。この図からわかるように、年間降水量は調査期間中に変動しました。さらに、記録された最小値と最大値は、西興部で(681mm、1320mm)、北見で(492mm、1083mm)、斜里で(424mm、1107mm)でした。明らかに、西興部で記録された年間降水量は、同期間に斜里と北見の両方の年間降水量よりも高い値となりました。さらに、1987年以降、記録された降水量にわずかな増加傾向(~125mm)が見られることに注目できます。

図2bは、ランダム性(MIG)と複雑性(EMC)の関係を示しています。MIG値は研究期間を通じて変動しました。MIG値が高いほど、その年の年間降雨日数が増加することを示しています。一方、図2bの複雑性スコアを観察すると、EMC値が高いほど複雑な降雨パターンとの相関が見られます。例えば、2016年には、5日連続で降雨量が中央値を超えるという稀なイベントが一度発生し、複雑な年間降雨パターンの可能性が高かったことが示唆されます。そこで、日々の降雨量が中央値を超える期間を追跡したところ、激しい降雨イベントは主に7月から11月にかけて発生することがわかりました。

さらに、西興部ステーションの場合、図2cからわかるように、1988年から2002年にかけて、特に9月に集中豪雨が発生していました。しかし、2012年以降、強度が低くなりながら、8月への逆行傾向が見られます。一般的に、本研究の結果は、このアプローチが、基礎的なパターンを理解することが不可欠な幅広い環境システムに効果的に適用できることを示唆しています。

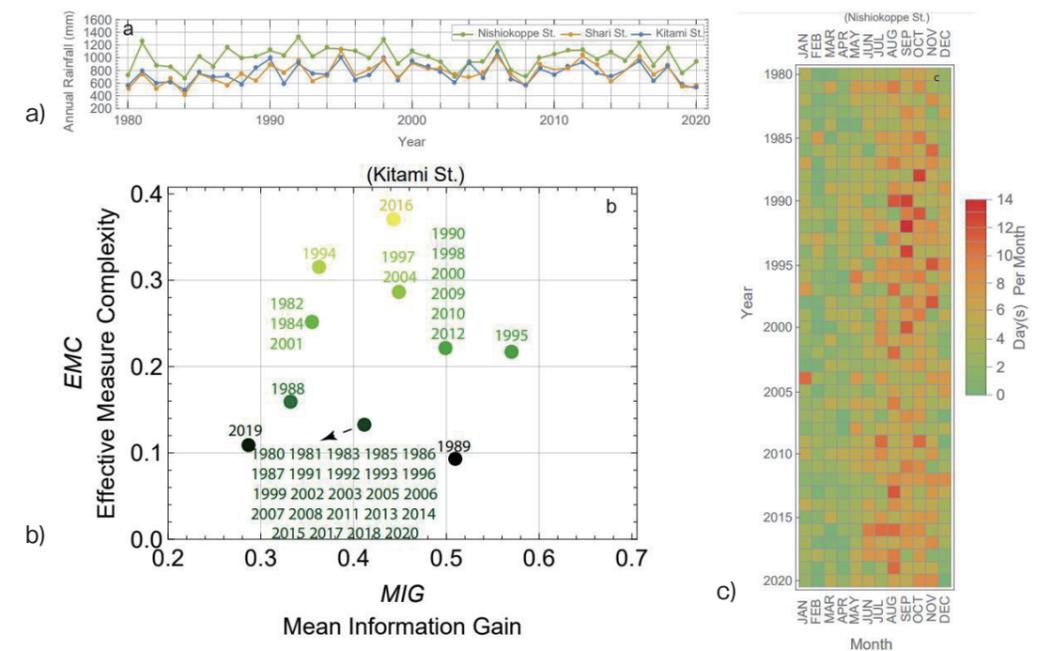


図2：a) 年間降水量の時系列、b) 情報複雑度推定値の年変動、c) 行列図は、月ごとの降水量が日平均降水量を超えた日数を示しています。

# アイスジャムによる水深上昇の推定手法の実河川への適用とアイスジャム現象解明のための水理実験



教授  
吉川 泰弘

## Highlights

- 実河川におけるアイスジャムによる水深上昇を、平均絶対誤差0.02mで推定しました。
- 水理実験により、アイスジャム内を流れる浸潤線と水深上昇に関係があることが分かりました。

寒冷地河川では、気温低下等により河道内に氷が形成され、気温上昇等により形成された河水が融解または破壊されて河道内を流下します。この河水が狭窄部等で堆積するとアイスジャムを引き起こし、流れが塞ぎ止められるため水深は急激に上昇します。アイスジャムがいつ、どこで、どの程度の規模で発生するかを事前に推定することが望まれています。どの程度の規模でアイスジャムが発生するかについて、水位を推定する手法が提案されていますが、本推定手法は、水路幅一定の水理実験で得られたデータを基にしており、水深により川幅が変化する実際の河川への適用性は不明となっています。

研究目的は、水理実験で得られたアイスジャムによる水深上昇の推定手法において、実河川へ適用を試みる事です。さらに、アイスジャムの流下方向の長さが水深上昇へ与える影響を明らかにするために、アイスジャム立体模型を用いた水理実験を実施しました。

### ●アイスジャムによる水深上昇の推定手法の実河川への適用

実河川を対象とした本推定手法の入力値は、アイスジャム発生前の値として、流量 $Q$ 、水位 $WL$ 、横断測量データです。アイスジャム発生時の値として、フルード数 $Fr$ 、氷塊の空隙 $\lambda$ であり計5つとなります。なお、既往の推定式は川幅一定の式

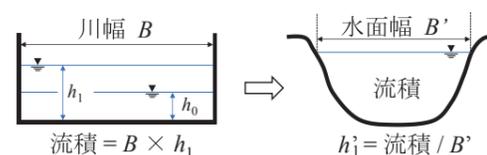


図1 水位上昇時の水面幅  $B'$  と最大水深  $h_i$  の算出方法

であり、実河川へ適用するために図1のような算出方法としました。出力される水深 $h_i$ と入力値の川幅 $B$ を乗じて流積を求め、横断測量データを用いて、この流積時の水面幅 $B'$ を求めます。この流積を $B'$ で除すことにより、実河川におけるアイスジャム発生時の最大水深 $h_i$ を算出しました。

2018年3月と2020年3月に北海道内でアイスジャムが発生した12事例を対象に、アイスジャムによるピーク水深における観測水深と本手法による計算水深の比較を行いました。図2にピーク水深における

観測値と計算値を塗り潰し黒丸で示します。図2より計算水深は観測水深を再現し、水深の平均絶対誤差は0.02mでした。最適値の変動範囲は、空隙 $\lambda$ は0.0~0.4、フルード数 $Fr$ は0.2~0.4、流量 $Q$ は1~10倍でした。空隙 $\lambda$ の平均値は0.2、フルード数 $Fr$ の平均値は0.4でした。

流量 $Q$ の倍数について検討を行いました。アイスジャム発生時刻の1日前からアイスジャム発生時のピーク水位となる時刻までの期間において、1時間毎の降水量を積算した積算降水量と流量の倍数の相関係数は0.74であり強い相関がありました。初期条件として与える流量は、アイスジャム発生前の値であり、アイスジャム発生時の降雨が、アイスジャム発生時の水深上昇へ影響を与えていることが推察されました。また、本推定手法を実河川で運用する場合、入力値は固定値で与えた方が簡便です。空隙 $\lambda$ は平均値0.2、フルード数 $Fr$ は平均値0.4、流量の倍数は1とした計算結果を図2の赤色四角(HP参照)で示します。水深の平均絶対誤差は0.94mでした。積算降水量が25.5mm以下の河川のみを対象とした場合には、水深の平均絶対誤差は0.38mでした。実運用として、これらの固定値を基準として水深上昇を推定し、この値を参考値として捉え、現場において降雨がある場合は、さらに水深が上昇する可能性があることを想定する等の実運用が考えられます。

### ●アイスジャム現象解明のための水理実験

図3に示すアクリルアイスを用いたアイスジャム立体模型を用いて水理実験を実施しました。実験条件は、空隙0.4として、流量は $0.016\text{m}^3/\text{s}$ 、 $0.014\text{m}^3/\text{s}$ の2パターン。水路床と立体模型との開口高さ $d$ は、0.03mと開口高さのフルード数を0.4、0.6、0.8とした場合の4パターン。立体模型の流下方向の奥行きは0.15m、0.30mの2パターンで16caseとしました。一つのcaseで3回の実験を行い、合計48回の実験を実施しました。実験の結果、立体模型の奥行きが0.15mから0.30cmに長くなると水深はより上昇し、立体模型内を流れる浸潤線の流下方向の長さが長いほど水深は上昇することが分かりました。立体模型の奥行き・浸潤線の影響を代表面積で考慮した結果、レイノルズ数 $Re$ と水深比の相関が強くなりました。

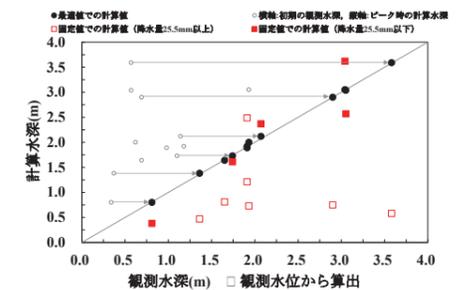


図2：ピーク水深における観測水深と計算水深

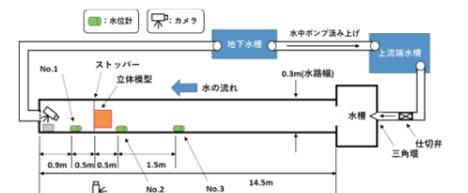


図3：立体模型を用いた水理実験の水路の平面図

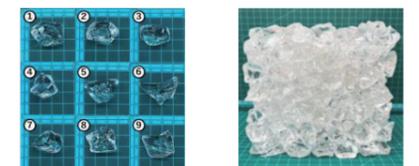


写真1：アクリルアイス、写真2：基準立方体

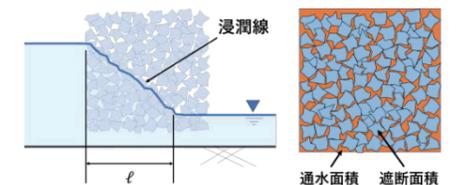


図4：浸潤線と流下方向の長さ  $l$  (左図)と全体の投影面積 (右図)：通水面積  $A_2 - A_1$  (橙色) + 遮断面積  $A_1$  (水色)

# 下路桁橋における積雪形成と部材応答の関係



助教  
門田 峰典



部門長・准教授 気象予報士  
白川 龍生

## Highlights

- 下路桁橋を対象に、積雪の形成メカニズムおよび積雪に伴う鋼部材のひずみ、傾斜を把握するため、音威子府村と共同で冬季計測を実施中です。
- 本橋では耐力的に問題ありませんが、積雪量の増加により主桁が横倒れ座屈する傾向が見られたため、今後、数値解析も実施し、積雪とひずみ、傾斜の関係性を整理していきます。

音威子府村が管理する中島橋は、2018年度の大雪の影響で主桁に変形が生じ、通行不可能となりました。村として重要なインフラであったため、調査・補修設計が行われ、2024年には当時の構造詳細で復元されております(写真1)。橋梁を設計する際には、地域性を踏まえた適切な雪荷重を設定することになっておりますが、このように突発的な大雪(いわゆるドカ雪)が発生する地域も存在しており、定外の荷重が構造安全性に影響を及ぼす事例も存在します。そこで本研究では、積雪の形成メカニズムおよび積雪に伴う部材応答を把握することを目的とし、復元後、初めて迎える冬季の共用に向け、音威子府村と共同で冬季計測を行っております。

計測項目は、インターバルカメラやレーザースキャンによる積雪形状と、鋼桁のひずみおよび傾斜です(写真2)。ひずみは支間L/2断面、傾斜は支間L/4断面で計測しました。まず、写真3には橋上の積雪の状況を示します。撮影した1月17日の、橋の端部で積雪水量(積雪を融かして水にしたときの水深)を測定したところ、190mm w.e.でした(この値は1m<sup>2</sup>あたり190kgの雪が積もっていることを意味します)。つづいて、図1にはひずみの推移を示します。なお、凡例のLは左側、Rは右側の上フランジとなります。R側ではばらつきが大きいものの、L側では圧縮ひずみの増加傾向が明確であり、除雪のタイミングで0近傍に戻っていることが確認できます。最大値は12/22と1/18に発生しており、後者は写真3に示す積雪状況での応答となります。このような状況ですが、鋼桁に生じるひずみは-200 $\mu$ 程度となり、構造安全性が確保できていることがわかります。また、図2には傾斜の推移を示しますが、橋軸方向(X方向)および橋軸直角方向(Y方向)では、12/22と1/18に大きな傾斜が発生しており、ひずみの結果と一致しています。特徴的なのは、橋軸直角方向(Y方向)も同程度傾斜しているということです。これは、上フランジの横倒

れを示しており、下路桁特有の応答となります。本橋では耐力的に問題ありませんが、2018年度に生じた主桁の変形は横倒れ座屈による可能性が高いため、今後は、数値解析も実施し、積雪とひずみ、傾斜の関係性を整理していきます。なお、本研究は、科学研究費補助金(24K07984)による支援を受けています。



主桁の変形(2018年)

復元後(2024年)

写真1：中島橋

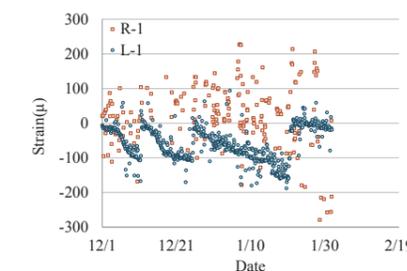


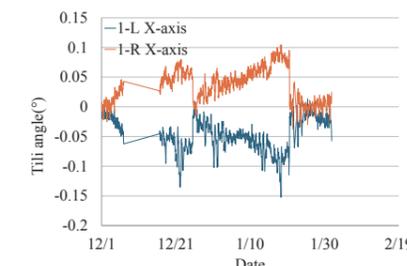
図1：ひずみの推移



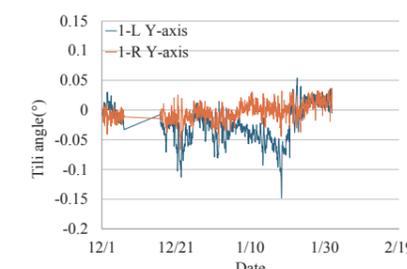
傾斜計

インターバルカメラ

写真2：機器の設置状況



橋軸方向



橋軸直角方向

図2：傾斜の推移



写真3：積雪状況(2025/1/17撮影、橋上の積雪水量：190mm w.e.)

# 寒中における補修施工の効率性向上に資する耐寒補修材料および施工方法の開発



教授 崔 希燮 教授 井上 真澄

## Highlights

■ 寒中補修施工において、耐寒促進剤の添加量の違いによるセメント系補修材料の水和物の生成挙動と強度発現との相関関係を明らかにすることで寒中補修施工の効率性向上が可能な補修材料の開発可能性を確認しました。

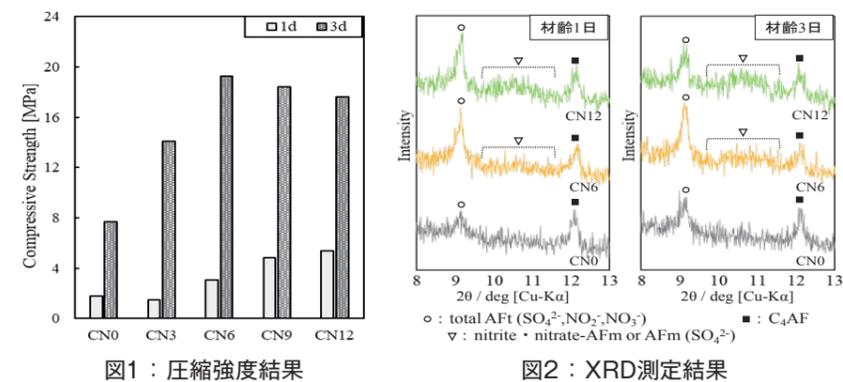
近年、コンクリート構造物の劣化に伴い補修に関心が高まっており、補修材ではポリマーセメントモルタルが付着性や母材コンクリートとの一体化に優れている観点から、非常に重要な補修材料であるとされています。しかし、寒冷地の補修施工において外気温が氷点下の場合には、補修材中の自由水が凍結し水和が進行せず初期凍害が発生することで、期待した性能が得られなくなります。その対策として、寒中補修施工において、セメント系補修材の水和反応を促進するため、無塩化・無アルカリ性の亜硝酸カルシウム(Ca(NO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>)および硝酸カルシウム(Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>)を主成分とする耐寒促進剤の使用が目立っています。

亜硝酸・硝酸塩系の耐寒促進剤は、その使用量が多いほどセメント中に含まれるC<sub>3</sub>AおよびC<sub>3</sub>Sの水和反応を促進させ、コンクリートの初期強度増進による初期凍結防止に効果があることが知られていますが、経時変化による水和物の生成挙動と強度発現との相関性については、まだ不明確な点が多いです。特に、既存研究によると、亜硝酸カルシウムと硝酸カルシウムを主成分とする耐寒促進剤の多量添加は、初期強度発現は良好ですが、長期的な強度発現性に悪影響を及ぼすことが報告されています。上述のような強度発現に寄与する詳細な水和反応機構に関しては不明確な部分が多く、多量に添加することで材齢初期において、Aft及びAFm生成量が増加し、反応水が大量に消費されることによるケイ酸カルシウム水和物(以下、C-S-Hと称す)や水酸化カルシウム(CH)などの生成量低減が懸念されているとともに、初期(24時間)以降の強度低下も報告されています。

そこで本研究では、まず亜硝酸カルシウムを主成分とした耐寒促進剤(CN)の添加量の違いによるセメント硬化体の初期強度発現性を求めました。また、セメント硬化体から採取した試料を対象として、X線回折(XRD)分析と熱重量・示差熱(TG-DTG)分析を用いてセメント硬化体の強度発現性と水和生成物との相関関係を明らかにすることを目的として、化学的検討を行いました。

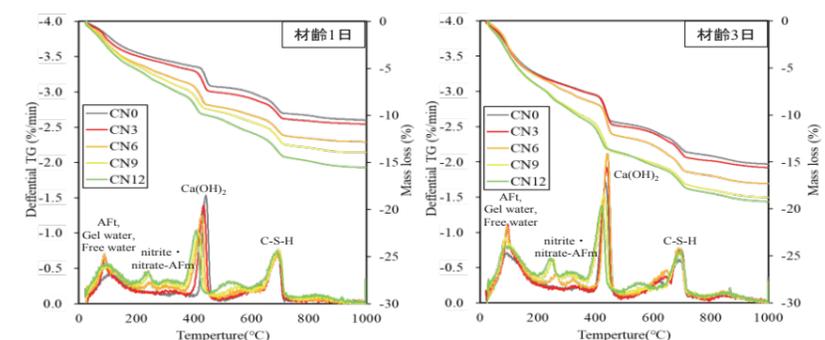
本研究の実験条件として、まず耐寒促進剤(CN)の標準添加量は、セメント質量に対して約4~7%であることから、耐寒促進剤の添加量による違いを明確に把握するため、セメント質量に対して0、3、6、9、12%の5水準としました。また、練混ぜと養生条件は温度10±1℃、湿度85±5%とし、材齢1・3日にて各種実験を行いました。

その結果、まず図1に圧縮強度試験結果を示します。材齢1日では、CNの添加量が多いほど強度が増加しましたが、材齢3日では、CN6、CN9、CN12のケースにおいて、添加量の増加に伴い強度が減少する傾向を示しました。図2にXRD測定結果を示



します。材齢1日に着目すると、AFtのピーク強度はCNを添加したケースの方が高くなっており、CN添加によりAFtの生成量が増加しているものと推察します。また、CNを添加したケースで nitrite・nitrate-AFmのピークが確認され、添加量に伴いピーク強度が高くなる傾向も示しました。一方、材齢3日に着目すると、CNを添加したケースにおいて、CN12のAFtのピークがやや小さくなっていますが、カルシウムアルミネート系水和物全体として大きな違いは見られませんでした。このことから、CNの多量添加に伴う材齢3日以降の強度減少はC-S-Hの生成量が原因であると考えられます。

図3にTG-DTG測定結果を示します。TG曲線について、材齢1日、材齢3日ともにCNの添加量が多いほど質量減少率が増加しており、CN添加に伴い水和物の生成量が増加したことが確認できます。DTG曲線について、CN6、CN9、CN12に着目すると、材齢1日、材齢3日ともに、添加量の増加に伴い、200~300℃



付近の nitrite・nitrate-AFmの分解ピークの増加と100℃付近のAFtとC-S-Hゲル間水の脱水ピークと400~500℃付近のCa(OH)<sub>2</sub>の脱水ピークの減少が見られました。なお、XRD測定結果より、CN添加に伴う材齢3日の100℃付近における吸熱ピークの減少は、C-S-Hゲル間水により生じたものと推測しました。このことから、CNの多量添加に伴う材齢3日以降の強度減少は、C-S-Hの生成量が減少したためだと考えられます。また、添加量の増加に伴いCa(OH)<sub>2</sub>の生成量が減少したことから、材齢初期の水和促進によって高C/S比のC-S-Hが生成することにより強度に悪影響を及ぼしたものとも考えられます。

最終的に、実験の範囲においては、CN添加量の増加に伴う、材齢1日の強度増加は多量のAFtや nitrite・nitrate-AFmが生成による内部微細空隙の充填、3日以降の強度減少はC-S-Hの生成量減少と高C/S比のC-S-Hの生成であることが確認できました。

# 亜硝酸リチウムと亜硝酸カルシウムを混合使用した耐寒PCグラウトの開発



教授 井上 真澄 教授 崔 希燮

## Highlights

- 2種類の亜硝酸塩を混合したペーストの流動性と氷点下環境における強度発現性を確認しました。
- PCグラウトの耐寒性を保持しつつ、材料コストを抑制する方策として、亜硝酸リチウムの一部を亜硝酸カルシウムに置換する方法を検討し、その可能性を見出しました。

寒中のグラウト工事では、低温によるグラウトの初期凍害や強度発現の遅れが問題となり、グラウト施工を避けざるを得ないケースが多いのが現状です。例えば、ポストテンション方式のPC構造物では、シース内に注入したグラウト中の水分が凍結・膨張し、周辺躯体にひび割れを誘発する恐れがあります(図1)。

このように、施工直後から低温に曝される環境では、グラウト材の耐寒性を高めることが重要です。その対策として、凍結点降下作用に優れる亜硝酸リチウム(LN)の使用が有効とされています。しかし、近年のリチウム需給バランスの変動により、LNの原料価格が高騰しています。一方、亜硝酸カルシウム(CN)は、一般的な寒中コンクリート施工において使用される耐寒剤の主成分として使用されており、セメントの水和を促進し、初期強度を向上させる効果があります。しかし、添加量を増やすと流動性が低下するため、凍結点降下作用には限界があります。

そこで本研究では、LNとCNを混合使用して耐寒性と経済性を両立するPCグラウトの開発を目的として、その流動性や氷点下環境における強度発現性などについて検討しました。

まずLNに対するCNの置換率を10%刻みで変化させたセメントペーストを対象に、その流動性と練上がり直後から-5℃環境で養生した場合の強度発現性を評価しました。CNの配合比を増加させると流動性が低下する傾向を示し

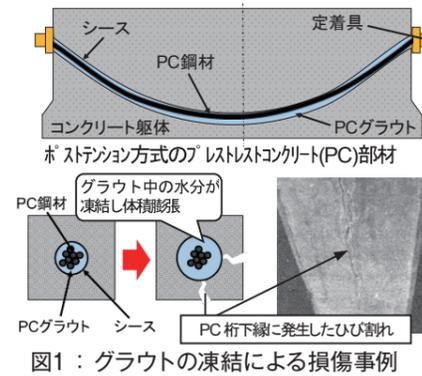


図1：グラウトの凍結による損傷事例

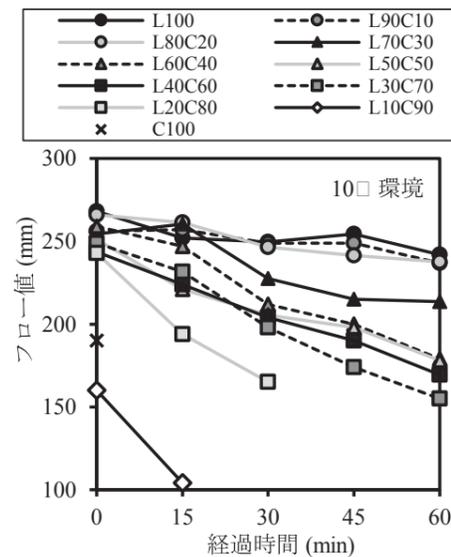


図2：ペーストフローの経時変化

ますが、CNの置換率が20%以下の範囲であれば良好な流動性が得られることを確認しました(図2)。一方、強度発現性については、CNの配合比が60%以上になると、強度発現の遅延やばらつきが顕著となりました。これは、凝結硬化の過程でペースト中の水分が凍結し、初期凍害を受けている可能性を示唆しています(図3)。

このように、セメントペーストを対象とした検討の結果、LNに対してCNを20%置換しても良好な流動性を維持でき、-5℃環境下においても凍結の影響を受けず、良好な強度発現性が得られることがわかりました。

この知見を踏まえて、市販のPCグラウト材への適用可能性を確認するため、PCグラウトの品質規格試験に準じて、レオロジー試験(図4、JSCE-F 531)、体積膨張率試験(図5、JSCE-F 535)、圧縮強度試験(JSCE-G 531)を実施しました。市販の超低粘性型PCグラウトをベースに、LNの一部をCN(20%)に置換した場合、練上がり直後の流動性は規格値を満たしたものの、15分以降の流動性保持が困難であることが判明しました。現場におけるPCグラウトの注入作業は1バッチあたり30~60分程度を要するため、このままでは施工に支障をきたす恐れがあります。そこで流動性の保持を目的として、高性能AE減水剤(A)とスランプ保持剤(B)を追加添加したところ、60分後まで良好な流動性が維持できることを確認しました(表1)。また、体積変化率や圧縮強度(材齢28日)についても、PCグラウトの品質規格値を十分に満足することが確認されました(表1)。以上の結果より、耐寒PCグラウトの材料コスト抑制策として、LNの一部をCNで置換する方法が有効である可能性を見出しました。

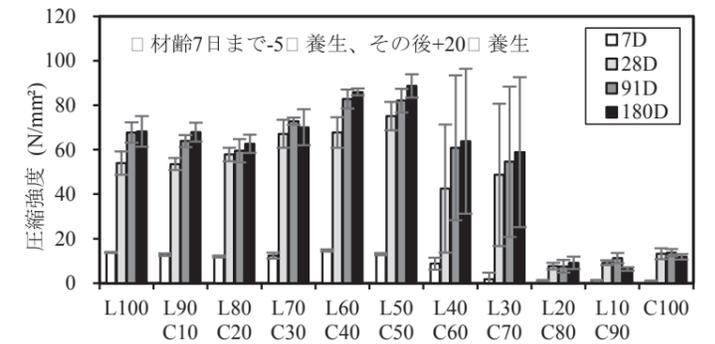


図3：ペーストの圧縮強度(7Dまで-5℃→20℃養生)



図4：レオロジー試験



図5：体積変化率試験

表1：実験要因および結果(PCグラウト)

配合	W/P (%)	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> 配合比(%)		亜硝酸塩添加率 (%)		混和剤		流下時間 (sec) ※3.5~6秒				体積変化率(%) ※-0.5~0.5%	材齢28日 圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> ) ※30N/mm <sup>2</sup> 以上
		LN	CN	LN	CN	減水剤	保持剤	0分	15分	30分	60分		
LC						0.0	0.0	5.8	—	—	—	—	—
LC-B0.0	38	80	20	2.4	0.75	0.8	0.0	4.5	7.0	8.0	17.3	—	—
LC-B0.8						0.8	0.8	4.5	6.6	7.0	8.6	-0.3	57.5
LC-B1.5						0.8	1.5	4.4	7.4	8.5	9.3	-0.2	58.3

□ 超低粘性型PCグラウトの品質規格値(PC工学会：PCグラウトの設計施工指針2012.12)

なお、本研究は日本高圧コンクリート株式会社・日産化学株式会社・北見工大の共同研究により実施されました。ここに記して深甚なる謝意を表します。

# 加速度計測に基づくコンクリート床版の効率的な維持管理手法の検討



助教  
門田 峰典

## Highlights

- 橋梁の活荷重たわみに着目した維持管理手法の確立を目的とし、橋長10m未満となるPCスラブ桁橋およびRC床版橋に対する車両走行実験を行うとともに、性能判定指標を検討しました。
- 提案する指標を用いることで、橋梁毎の相対的な対比が容易となることから、定量的なデータに基づく性能の見立てが可能になります。

北見市は、2006年に1市3町が合併し、北海道で1位、全国で4位の広大な面積を有しております。管理橋梁数は524橋で、札幌市・旭川市に次ぐ北海道で3位となっており、自治体人口規模に比較して多くの橋梁を抱えていることとなります。そのような中、5年に1度実施する定期点検では、点検結果のばらつきが課題となっており、2025年度からの3巡目の定期点検に突入するにあたり、利用実態が異なる橋梁構造物の性能を省力的かつ効率的に見立てる必要があります。このような背景の下、本研究では、全国の自治体に先駆けた性能の見立てを行う手法として、橋梁の活荷重たわみに着目した維持管理手法の確立を目的としております。本稿では、橋長10m未満となるPCスラブ桁橋40橋およびRC床版橋9橋に対する車両走行実験を踏まえた性能判定指標、本手法の有効性について示します。なお、本研究は北見市、日本航空電子工業株式会社、北見工業大学の共同研究です。

実験方法は、橋面上に加速度計を等間隔に9箇所設置し、大学所有のハイエースグランドキャビンを用いて、幅員中央を走行した際の応答を計測しました(図1、写真1)。加速度計は、日本航空電子工業株式会社製の3軸MEMS加速度計JA-70SAとし、得られた加速度波形に対し、フィルタリングで積分前処理を実施し、2階積分により鉛直変位を算出しました。

提案する性能判定指標のコンセプトとしては、実測たわみと理論たわみには線形関係がある中で、床版に何らかの変状が発生する場合は、理論たわみに比べて実測たわみが大きくなり、全体の傾向から逸脱するはずだと考えました。図2を見ると、実測たわみと理論たわみには、全体的に右肩上がりの傾向が見られますが、「齋藤橋」、「第3号橋」は、上方へのシフト量が大きい結果となりました。両橋梁の状況を現地で確認すると、床版内部の状況は不明でしたが、漏水に伴う変状が進行している可能性が高いこと

がわかりました。この結果を踏まえてすぐに対策を講じるというものではありませんが、本指標を用いることで、定量的なデータに基づく性能の見立てが可能となることを示しました。

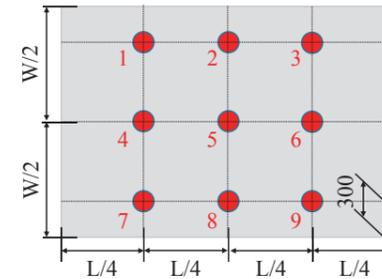


図1：加速度配置図

写真1：車両走行状況

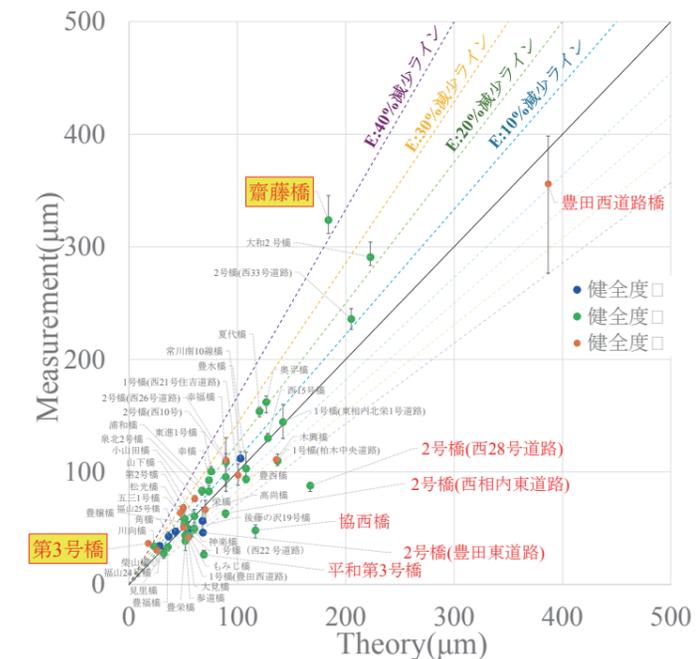


図2：たわみと理論たわみの関係(性能判定指標)

北海道建設新聞 2025年(令和7年)1月27日(月曜日)



図3：新聞記事

# 一軸引張を受ける金属パテ材 補修鋼板の性能に関する実験的検討



## Highlights

- 補修鋼板の引張試験を実施し、補修後の性能を把握するとともに、そのパフォーマンスを向上するための施工方法について検討しました。
- 板コバのカットや応力集中部の加工を行うことで、通常の施工よりも付着力が増加することを示しました。

横断歩道橋は、昭和40年代（1965年～1974年）をピークに建設され、現在、老朽化が進行しています。寒冷地においては、凍結融解がさらに舗装のひび割れを加速させ、そこから内部に漏水することで、鋼部材の腐食が顕著に発生します。横断歩道橋は、その使命から一般的に重交通路線上に架かっており、修繕の際には交通規制や高所作業車もしくは足場が必要となります。つまり、道路橋よりも費用が割高になる傾向があります。このオホーツク管内でも12橋の横断歩道橋が存在しており、昨年の夏には、北見市大通り東9丁目歩道橋の補修が行われました。

鋼構造物の補修には、ボルトや溶接による当て板が一般的に用いられますが、現場で大掛かりな機材が必要になることから、横断歩道橋の腐食部や欠損部においては簡易的に施工が可能な金属パテ材による補修実績が増加しています。本研究では、補修鋼板の引張試験を実施し、補修後の性能を把握するとともに、そのパフォーマンスを向上するための施工方法について検討しました。

引張試験は、大学内にある万能試験機を用いて行いました。試験片の寸法は長さ400mm×幅70mmの平鋼板とし、板厚は階段床組みを構成する蹴上げ板および踏板の4.5mm、鋼材はSS400としました。試験ケースとして、健全ケース、腐食ケース（50%減肉）、欠損ケース（板厚ゼロ）、腐食補修ケース、欠損補修ケースの5ケースで検討しました。写真1には、補修基本案（通常の補修方法）の試験片を示します。

健全・腐食・欠損ケースを比較すると、断面積の減少率に比例して、剛性の減少が見られました。また、補修ケースでは、引張荷重に対して20kN程度までは鋼材に密着できていることを確認しました。なお、実際に生じる荷重については、今後の研究にて把握していきます。

金属パテ材と鋼材との付着力を高めることは、維持管理費を軽減するうえで重要となります。そこで、ドリルで開けた孔にパテ材を充填することでパテ材の抵抗を期待する「アンカー案」、板コバ面を斜めに

カットしてパテ材との接触面積を増加させる「コバカット案」を検討しました。また、角部での応力集中によってパテ材が剥離することが懸念されたため、Rを施工した「応力分散案」も検討しました。写真2に試験片の一部を示します。

表1には、剥離開始時の荷重と金属パテ材中央の最大ひずみを示します。なお、剥離開始の判断は、パテ材表面のひずみが減少した時点としました。「アンカー案」と「コバカット案」を比較すると、「コバカット案」の方が、剥離開始時の荷重とパテ材表面の最大ひずみで増加が見られ、より付着力を増加できることを示しました。また、「全幅コバカット案」の結果から、コバカットの範囲を長くすることで、付着力が増加することもわかりました。欠損補修において、応力分散案を適用することで、付着力が増加することを確認しました。



写真1：補修基本案の試験片

写真2：付着力を高める施工方法案

表1：剥離開始時の荷重と金属パテ材中央の最大ひずみ

	腐食補修			欠損補修		
	基本案	アンカー案	コバカット案	基本案	アンカー案	コバカット案
剥離開始時の荷重(kN)	26.3 (1.00)	29.7 (1.13)	36.6 (1.39)	23.2 (1.00)	22.1 (0.95)	22.9 (0.99)
パテ材表面の最大ひずみ(μ)	1436 (1.00)	1995 (1.39)	2116 (1.47)	252 (1.00)	2386 (9.5)	2790 (11.1)
		全幅コバカット案		応力分散案	応力分散+コバカット案	
剥離開始時の荷重(kN)		45.9 (1.75)		26.0 (1.12)	23.1 (1.00)	
パテ材表面の最大ひずみ(μ)		2105 (1.47)		3326 (13.20)	2108 (8.37)	

※( )内は補修基本案に対する比率  
※コバカット案は中央部の40mm範囲のみ

## 横断歩道橋における階段部の耐荷性能の把握 (その2)



助教  
門田 峰典



学生  
岩本 彩伽

### Highlights

- 実物供試体による荷重実験を行い、上側の蹴上げ板が欠損した際の耐荷性能および使用性能について検討しました。
- 全幅欠損することで、健全状態と比べて剛性が低下するものの、設計荷重に対して構造的な安全性が確保されていることがわかりました。また、たわみも制限値以下となり、使用上問題ないことを確認しました。

横断歩道橋は、昭和40年代(1965年~1974年)をピークに建設され、現在は老朽化が進行しています。横断歩道橋の階段床組み(蹴上げ板、踏板)に着目すると、表面は凹凸を有しており滞水がしやすいことに加え、道路橋に比べて4.5mmと薄い鋼材を使用していることから、腐食の進行が早く、早期に欠損に至る部位となります。さらに、寒冷地においては、凍結融解が舗装のひび割れを加速させ、鋼材への水かかりを助長させます。このように、直接群衆荷重を支持する階段床組みは、構造安全性の観点から、腐食が軽微な段階で修繕する必要があると言えます。ただし、腐食損傷の程度と耐荷性能および使用性能の関係性については明らかになっておりません。これまで著者らは、実物供試体を用いた荷重実験およびFEM解析により、健全状態における性能を評価してきました。本年度は、当該部に実際に起こりうる腐食損傷として欠損(板厚ゼロ)を供試体に模擬し、荷重実験を行いました。

供試体を写真1に示します。供試体は市内の鉄工所で製作し、実験室に搬入した後、グラインダーにて欠損を与えました。本実験では、写真2の事例のように上側の蹴上げ板が欠損する条件とし、左側から①375mm(W/4)、②750mm(W/2)、③1125mm(3W/4)、④1500mm(W)と欠損が長くなることによる性能への影響を検討しました。欠損の再現状況を写真3に示します。荷重の対象は中段の踏板とし、幅200mm×長さ200mm×厚さ100mmのゴム板を最大5つ使用することで、集中的な荷重から分布荷重、偏心荷重を再現できるようにしました。

図1には、集中的な荷重が荷重される場合を想定し、踏板中央に1つのゴム板を設置して荷重した場合の荷重-変位関係を示します。縦軸は試験機の荷重、横軸は踏板中央の鉛直変位です。健全状態と比較すると、欠損幅が踏板中央を越える③1125mm(3W/4)、④1500mm(W)において、傾き(剛性)が著しく低下する傾向が見られました。ただし、この荷重条件で換算した設計荷重は0.5kN程度となり、全

幅欠損しても荷重低下を示さず、構造的な安全性は確保されていることがわかりました。また、たわみも制限値である2.5mm以下となり、使用性能に影響しないことがわかりました。

上記は、踏板の奥側の1辺が欠損し、支持を失った状態の結果になりますが、手前側や横側も欠損するため、今後は複合的な欠損の影響を実験および解析的に把握するとともに、金属パテ材による補修の効果も検討していきます。

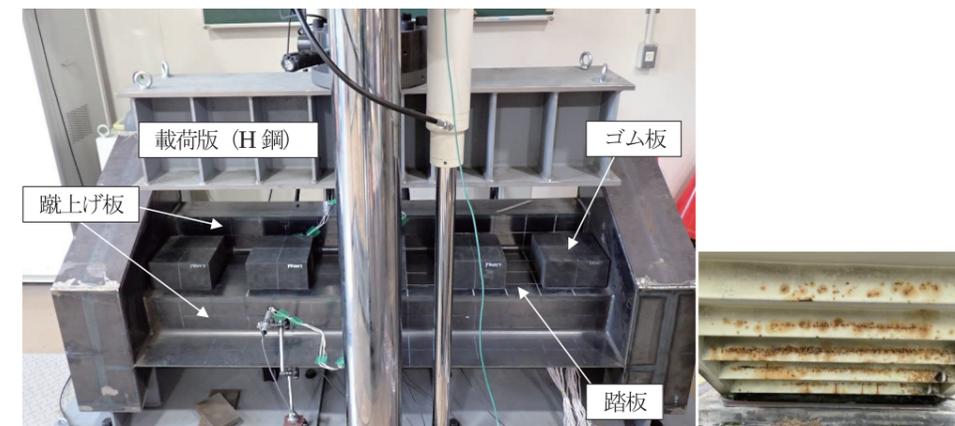
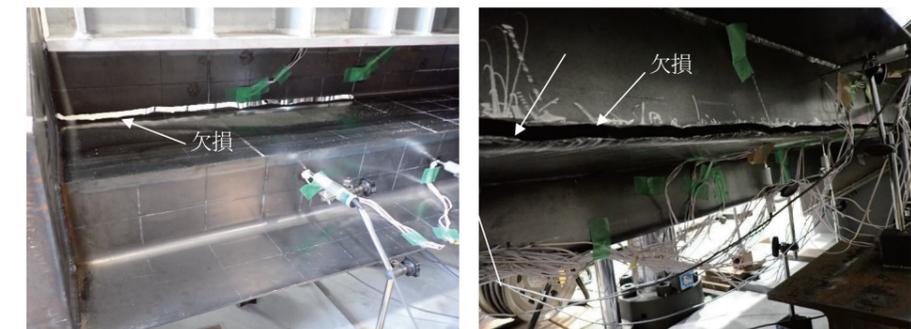


写真1：供試体

写真2：実際の欠損事例



a) 欠損750mm(W/2)の表面写真

b) 欠損1500mm(W)の裏面写真

写真3：欠損の再現

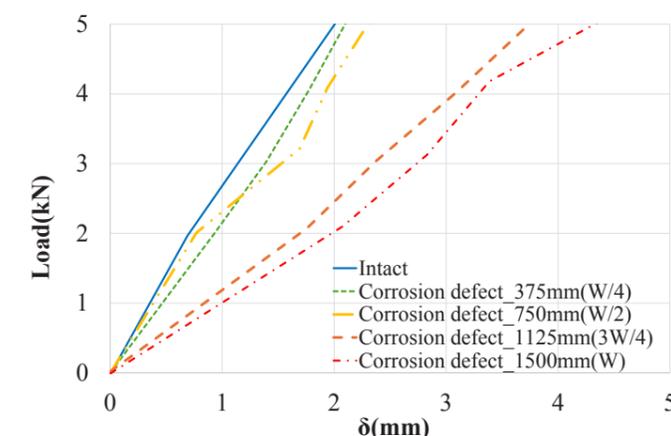


図1：荷重-変位関係

# 凍上による太陽光電池アレイ用鋼製架台の部材応答



教授 中村 大      助教 門田 峰典

## Highlights

- 太陽光電池アレイ用鋼製架台を構成する部材(支柱、ブレース、中間梁)の凍上時の変形特性を把握しました。
- 凍上量の増加に伴い、支柱の曲げ変形が卓越し、接合部で致命的な損傷が発生することが考えられるため、支柱中央にブレースを追加するなどの補剛対策を検討することが望ましいことがわかりました。

近年、道東地域において、凍上現象に起因すると思われる太陽光発電施設の被害が相次いでおります。写真1には、実際に発生した太陽電池アレイ用鋼製架台(以降、架台と呼称)の被害例を示しますが、太陽電池モジュール(以降、モジュールと呼称)を支える支柱のねじり変形や、支柱間の変形差によるモジュールの持ち上がりが確認できます。数多く存在する既存架台の凍上対策を行うためには、まずは、凍上が架台およびモジュールに及ぼす影響を定量的に把握することが肝要となります。そこで本研究では、実物供試体を用いた冬季の屋外実験を実施しました。

本実験は、2023年11月から2024年4月までの期間において、写真2に示す供試体の部材ひずみ、傾斜、凍上量、部材温度を計測しました。凍上は、写真2の赤丸印(HP参照)で示す中央の柱(前支柱、後支柱)のみで生じる条件としております。ひずみは図1に示す▲の位置、傾斜は■の位置としており、前後支柱、ブレース、中間梁を対象としました。

図2には、計測結果のうち、ひずみ応答を代表して示しております。前支柱では、正面奥側に凸となる曲げ変形と面外変形が、後支柱では、正面手前側に凸となる曲げ変形がそれぞれ生じることがわかりました。とくに、後支柱の下側では、凍上量が-20mmを超えた辺りからフランジのひずみは横ばいを示す一方、ウェブでは圧縮ひずみが増加し、一時的に同じひずみとなっております。これは、凍上量の増加とともに反力も増加し、基礎と支柱下端を接続するボルト部ではこの分担が大きく、すべりが生じたと考えられます。また、ブレースでは、正面奥側に凸となる曲げ変形を示すことがわかりました。なお、本稿では傾斜のデータを示していませんが、ブレースや中間梁ではねじりが発生することを特定しております。

凍上量の増加に伴い、支柱では曲げ変形が卓越し、接合部で応力集中による致命的な損傷が発生

することも十分考えられるため、支柱中央にブレースを追加するなどの補剛対策を検討することが望ましいと考えます。

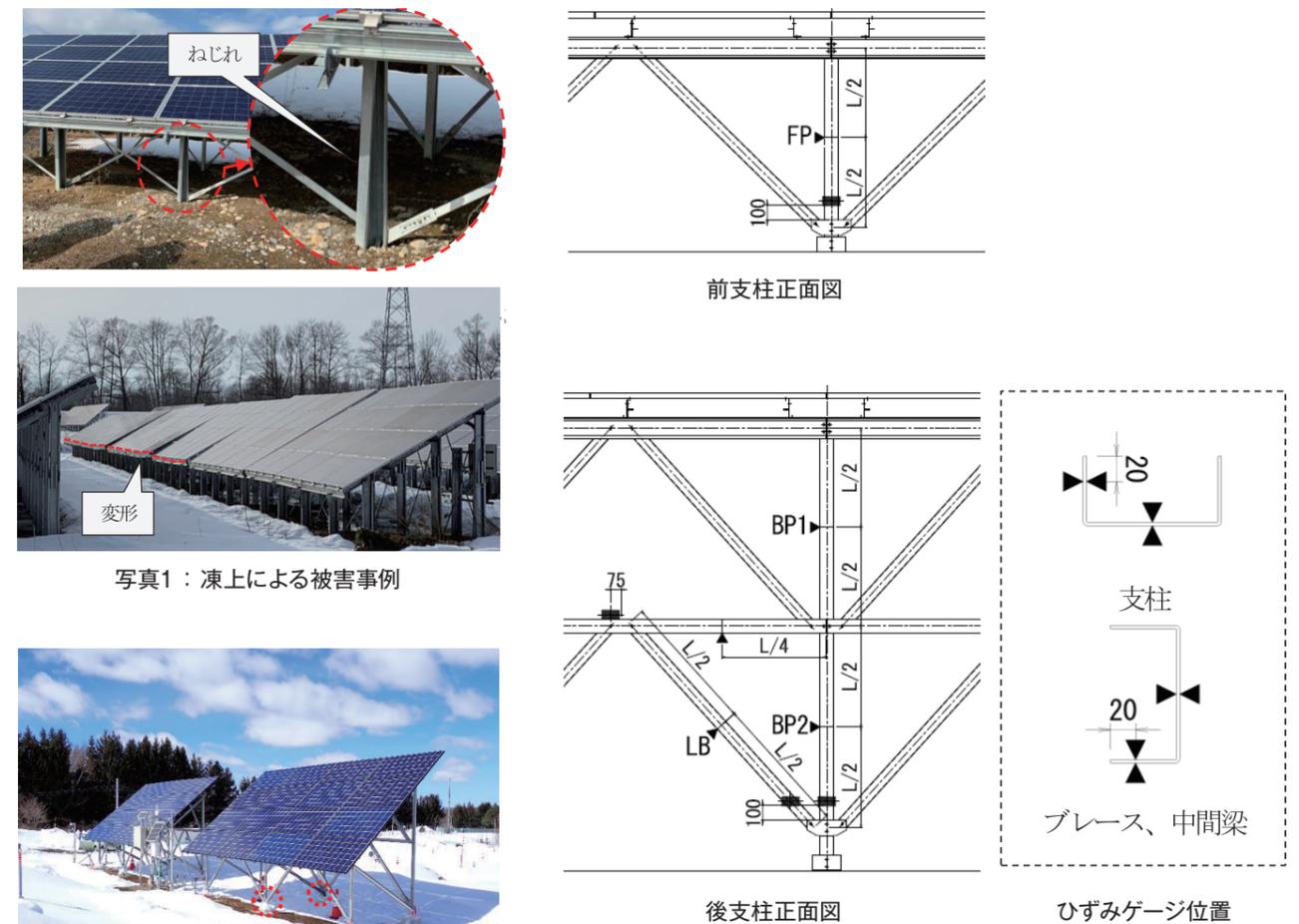


図1：計測条件

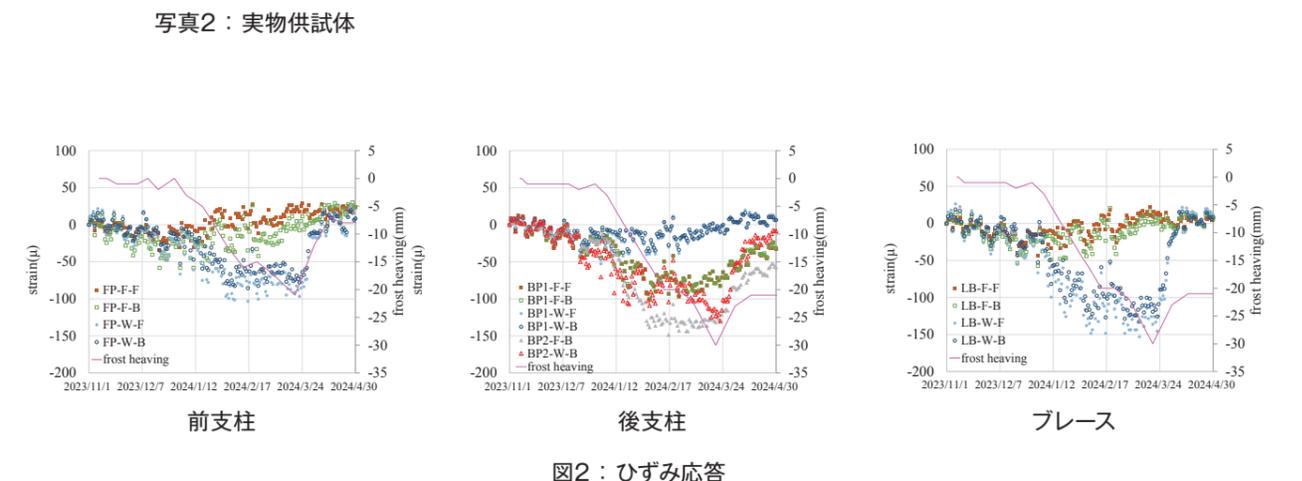


図2：ひずみ応答

# 凍上を模擬した太陽光電池アレイ用鋼製架台のジャッキアップ実験



教授 中村 大      助教 門田 峰典

## Highlights

- 太陽光電池アレイ用鋼製架台に対して90mm程度のジャッキアップを行った結果、実現象で生じる凍上被害と一致する応答が確認され、発生メカニズムを明確にすることができました。
- 本実験で対象とした架台においては、ジャッキアップ量が増加することで、前支柱の桁梁同士が先行して接触し、変形を拘束することがわかりました。

近年、道東地域において、凍上現象に起因すると思われる太陽光発電施設の被害が相次いでおります。写真1には、実際に発生した太陽電池アレイ用鋼製架台(以降、架台と呼称)の被害例を示しますが、太陽電池モジュール(以降、モジュールと呼称)を支える支柱のねじり変形や、支柱間の変形差によるモジュールの持ち上がりが確認できます。数多く存在する既存架台の凍上対策を行うためには、まずは、凍上が架台およびモジュールに及ぼす影響を定量的に把握することが肝要となります。2023年11月から2024年4月まで実施した屋外実験では、凍上の増加に伴う各部材の応答特性や荷重の分担や伝達について明らかにしております。ただし、実際に生じる最大凍上量を下回ったため、構造物としての限界値を把握する目的で、凍上を模擬したジャッキアップ実験を実施しました。なお、本実験は、SAFERのクレジットで報道機関に向けた公開実験としました。

本実験では、供試体の部材ひずみ、傾斜、ジャッキアップ量(凍上量)、ジャッキ反力などを計測しました。なお、ジャッキアップは中央の前支柱のみとしております(写真2)。

図1には、反力と変位の関係を示します。まず水平変位に着目すると、ジャッキアップ序盤は若干プラス側に変形し、時計回りのねじりを示しますが、7kNあたりからマイナス側の値にシフトし、反時計回りのねじりに移行することがわかりました。最終的には90mmまでジャッキアップを行いました。実現象で確認される支柱のねじり変形を示しました。つづいて、鉛直方向に着目すると、10kN～16kN、16kN～で剛性変化を示すことがわかりました。10kNを超えた辺りから、ボルト接続部で「ギシギシ」という音が聞こえるようになったことから、恐らく、ボルト部ですべりが発生し、部材の回転に伴い変位が増加した可能性が高いと考えております。なお、16kN以降の剛性低下の要因については、今後、部材応答を踏まえ

て確認していきます。写真3には、90mmジャッキアップ時点の変形状況を示します。当初、モジュール同士が干渉して、致命的な損傷が生じると想定しましたが、前支柱の桁梁下端が先行して接触することで、架台全体の変形を拘束することがわかりました。



写真1：凍上による被害事例



写真2：実物供試体に対するジャッキアップ実験状況

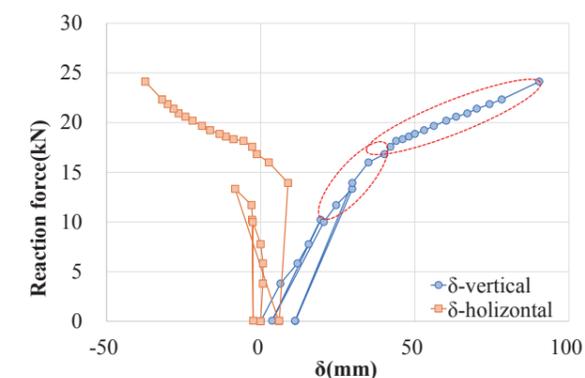


図1：反力-変位関係



写真3：変形の状況

# スパイラル杭の引抜き時における地盤挙動のX線CTスキャンによる可視化



教授 中村 大  
助教 門田 峰典

## Highlights

■ X線CTスキャンを用いて、スパイラル杭の引抜きで生じる地盤の変形挙動を可視化することに成功しました。この実験により、羽根の角度が小さいスパイラル杭の方が、角度が大きい杭と比べて最大荷重が大きくなることが明らかになりました。

太陽光発電施設の建設に用いられる各種の杭のうち、羽根のあるスパイラル杭は、羽根のない杭に比べて優れた引抜き抵抗を有することが、既往研究により明らかになっています。しかしながら、スパイラル杭の引抜き抵抗力の発揮メカニズムには不明な点が多く、未解明の部分が残されています。そこで本研究では、小型の引抜き試験装置を開発し、試験後にX線CTスキャンを用いて杭の引抜きに伴う地盤内部の変形を詳細に観察しました。特に、本研究では羽根の角度と引抜き抵抗の関係に着目し、実験を進めました。

本研究では、含水比 $w$ を35%に調整した砂質土を内径100mm、高さ100mmの亚克力容器に投入し、1層10mmとし、合計6層に分けて動的に締固めて供試体を作製しました。なお、締固め度 $D_c$ は85%としました。作製した供試体に、羽根の有無や角度(15°、30°、45°)の異なる4種類の杭を、インパクトドライバーを用いて地表面から深さ40mmまで回転貫入させました。なお、スパイラル杭の羽根を含めた直径は15mmとしました。

図1は本研究で用いた引抜き試験装置の模式図です。引抜き試験には、油圧で引抜き速度を制御できる荷重装置を使用しました。この装置を用いて杭を1mm/minの速度で5mm引抜きました。

引抜き試験前後にはX線CTスキャンを行い、供試体内部の変形を観察しました。さらに、引抜き試験後には写真測量(SfM)を行って、供試体に形成された破壊痕の観察を行いました。

図2は各種の杭の引抜き試験結果を示しています。まず、羽根の有無に注目すると、羽根のあるスパイラル杭の最大荷重は、羽根のないストレート杭に比べて明らかに大きいことがわかります。スパイラル杭では引抜きの際に羽根に土圧が作用し、杭周囲の土も持ち上げようとするため、

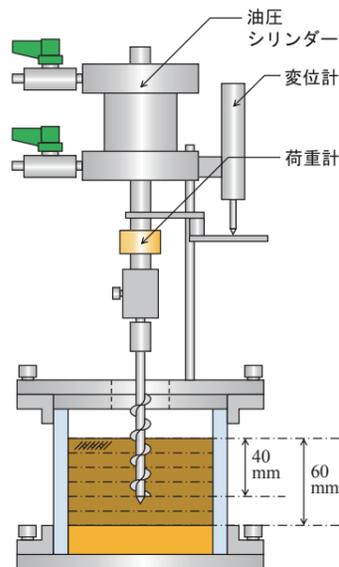


図1：引抜き試験装置の模式図

大きな引抜き抵抗が発生します。一方で、ストレート杭では引抜きに抵抗するのは杭の周面摩擦力のみであるため、荷重は小さくなるものと考えられます。次に、スパイラル杭の羽根の角度に注目すると、角度が小さい杭の方が、角度が大きい杭と比べて最大荷重が明らかに大きいことがわかります。

図3に引抜き試験後におけるX線CTスキャン画像を示します。まず、スパイラル杭に注目すると、供試体には、杭の先端から逆三角形形状にひび割れが形成されていることが確認できます。一方で、羽根のない杭では供試体にはひび割れは発生しませんでした。次に、スパイラル杭の羽根の角度に注目すると、羽根の角度が大きくなるに従って(15°→45°)、供試体に形成されるひび割れの角度が急

になっているように見受けられます。図4に引抜き試験後に形成された破壊痕のコンター図を、図5に破壊痕の断面図を示します。両図から、スパイラル杭では羽根の角度が小さくなるに従って(45°→15°)、形成された破壊痕が大きくなる傾向が見られます。このことから、引抜き時に杭とともに持ち上がる土の量は、羽根の角度が増加するにつれて減少するものと考えられます。

今後もX線CTスキャンを活用した引抜き試験を継続し、スパイラル杭における引抜き抵抗が発揮されるメカニズムを明らかにするとともに、より効果的で経済性に優れた杭の設計および施工方法について検討していきたいと考えています。

本研究は、公益財団法人 土科学センター財団の支援を受けて行われました。実施にあたり、ご支援いただいた土科学センター財団に対し、心より感謝申し上げます。

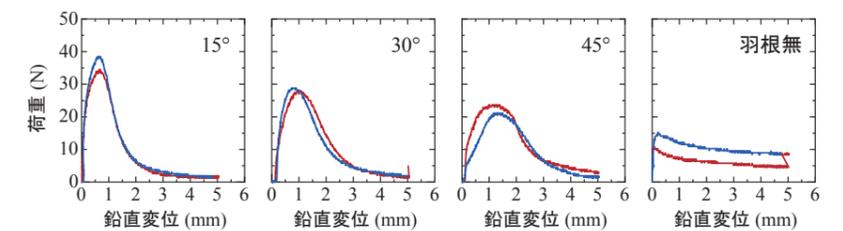


図2：各種の杭の引抜き試験結果

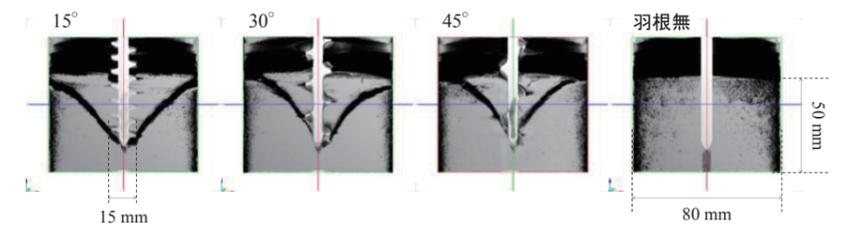


図3：引抜き試験後におけるX線CTスキャン画像

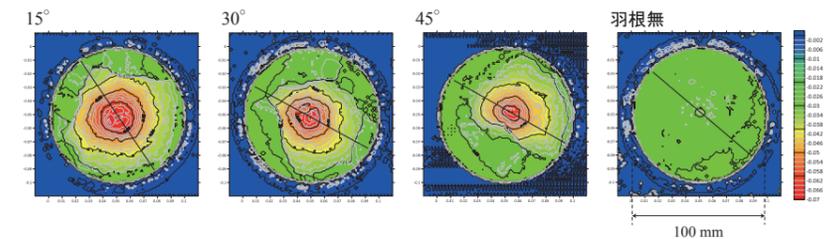


図4：引抜き試験後におけるX線CTスキャン画像

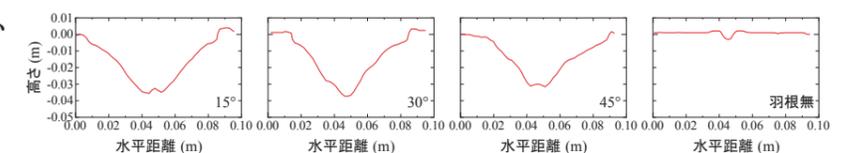


図5：引抜き試験によって形成された破壊痕の断面図

# 土の含水比変化がスパイラル杭の引抜き抵抗に及ぼす影響の解明



教授 中村 大  
助教 門田 峰典

## Highlights

- スパイラル杭の引抜き抵抗はストレート杭に比べて明らかに大きいことが明らかになりました。
- 引抜き抵抗は最適含水比よりもわずかに湿潤側で最大となり、それを超えると急激に低下する傾向が確認できました。

近年、北海道の山間部や遊休農地等において太陽光発電施設が積極的に建設されていますが、凍上現象による被害が散見されるようになってきました。また、我が国では豪雨や突風といった極端気象が増加傾向にあります。太陽光発電施設において冬期に凍上現象が発生し、これを支える杭の引抜き抵抗が失われた状態で夏期を迎えた場合、豪雨や突風で太陽光発電施設が倒壊する等の甚大な被害が発生する懸念があります。

そこで本研究では、太陽光発電施設の建設に用いられる杭の小型模型を作製し、室内における引抜き試験を実施しました。本研究の目的は土の含水比変化がスパイラル杭の引抜き抵抗に及ぼす影響を解明することであり、特に羽根の有無に着目して試験を行いました。

本研究では、含水比 $w$ を31%、34%、37%、40%に調整した砂質土をアクリル容器に投入し、1層40mm、合計5層で動的に締固めて土供試体を作製しました。なお、締固め度 $D_c$ は80%です。作製した土供試体に、スパイラル杭とストレート杭を、インパクトドライバーを用いて地表面から深さ80mmまで回転貫入させました。

図1は本研究に用いた引抜き試験装置の模式図です。引抜き試験はメガトルク式中型三軸試験装置を流用して行い、杭を3mm/minの速度で12mm引抜きました。なお、引抜き試験時の荷重と鉛直変位は、杭の上方に設置した荷重計と変位計で計測しています。また、引抜き試験前後には写真測量(SfM)を行い、土供試体表面の変形を観察しました。

図2は2種類の杭の引抜き試験結果を示しています。まず、含水比で比較すると、引抜き抵抗は両方の杭において $w \approx 34\%$ で最大となっており、含

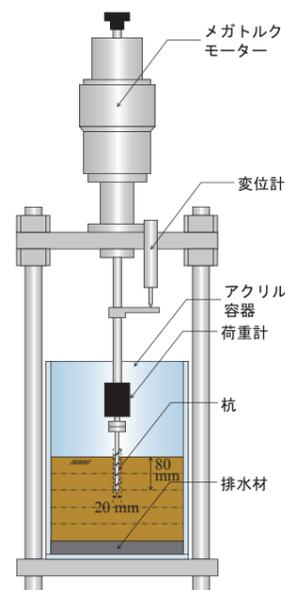


図1：引抜き試験装置の模式図

水比が増加するに従って低下する傾向が確認できます。これは、土供試体の含水比の増加に伴い、サクシオンが低下していくためと推察されます。次に、羽根の有無で比較すると、スパイラル杭の荷重はストレート杭に比べて明らかに大きいことがわかります。

図3は引抜き試験後の土供試体の表面形状を示しています。まず、羽根の有無で比較すると、スパイラル杭では土供試体表面に大きな変形が確認されましたが、ストレート杭ではほとんど

変形が生じていませんでした。次に、含水比による違いを比較すると、スパイラル杭では含水比が増加するにつれて、土供試体表面の変形範囲が徐々に狭くなること確認されました。このことから、引抜き時に杭とともに持ち上がる土の量は、含水比の増加に伴い減少すると考えられます。

図4は引抜き試験時の最大荷重と含水比の関係を示しています。図から、最大荷重は両方の杭において $w \approx 34\%$ 付近で最も大きくなり、それを超えると急激に低下することが確認されました。

本研究により、スパイラル杭の引抜き抵抗はストレート杭に比べて明らかに大きいことが確認されました。また、引抜き抵抗は最適含水比よりもわずかに湿潤側で最大となり、それを超えると急激に低下する傾向が見られました。これらの結果から、夏期の豪雨時や春期の凍結融解直後など、地盤の含水比が高い時期には杭の引抜き抵抗が大幅に低下し、強風による太陽光発電施設の倒壊リスクが高まる可能性が示唆されました。

本研究の成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の一環として得られたものです。また、これらの成果は、NEDOが取りまとめる太陽光発電システムの設計・施工ガイドラインに技術資料として盛り込まれる予定です。

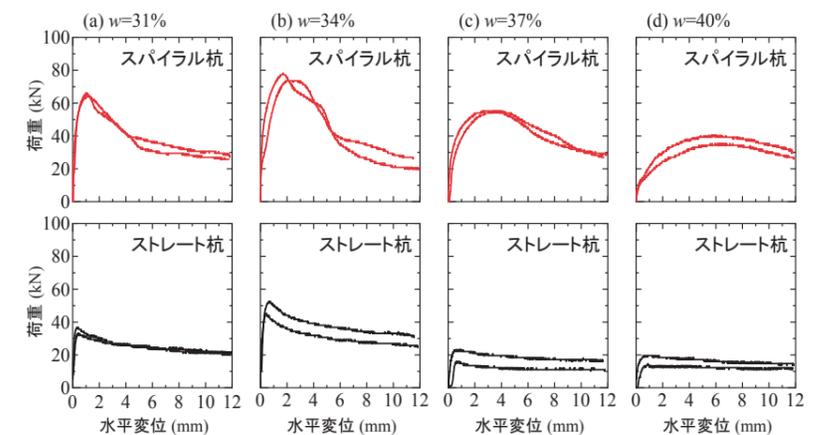


図2：2種類の杭の引抜き試験結果

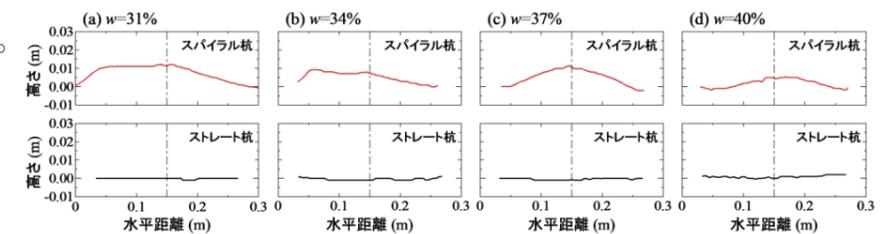


図3：引抜き試験後の土供試体の表面形状

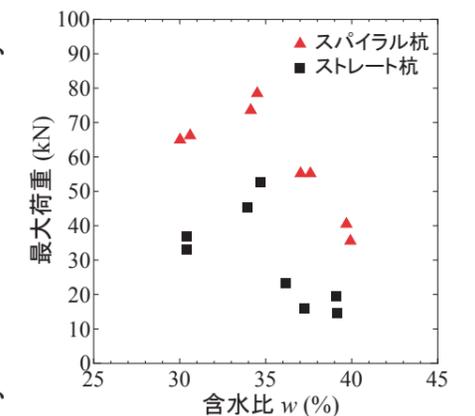


図4：最大荷重と含水比の関係

# 凍結融解履歴が 岩盤斜面の安定性に及ぼす影響の解明



教授  
中村 大

## Highlights

- 凍結融解履歴が泥岩のせん断強度を大きく低下させることが明らかになりました。
- 安定解析により、凍結融解履歴が泥岩からなる岩盤斜面の安定性を著しく低下させていることを明らかにしました。

北海道のような積雪寒冷地域では、地盤の凍上現象により、トンネルや道路、のり面保護工といった土木構造物が変状することが広く知られています。特に、道路とその付帯構造物の凍上被害は毎年のように発生し、建設コストや維持管理コストを増大させる要因となっています。近年、こうした凍上被害の中でも特に岩盤斜面の凍上が注目されています。これまでの研究の多くは土を対象としており、岩石に関する研究は十分に進んでいません。



図1：岩盤斜面の凍上被害の一例

図1は道東地域の泥岩からなる岩盤斜面で発生した凍上被害の一例です。この被災箇所では、岩盤の表層部分が土砂化し、表層崩壊が多発しています。そこで本研究では、実際に凍上被害が発生した岩盤斜面で岩石試料を採取し、未凍結状態と凍結融解履歴を与えた状態の2種類の供試体を用いて定圧一面せん断試験を実施し、凍結融解履歴が岩石のせん断強度特性に与える影響について解明することに取り組みました。また、定圧一面せん断試験から得られた強度定数を用いて、無限長斜面を想定した安定解析も行いました。

岩石試料には、北海道浦幌町で採取した泥岩を使用しました。供試体は直径60mm、高さ20mmの円板形としました。未凍結状態の供試体は、水を満たした容器内に1週間以上浸漬し、飽和度を高めました。一方、凍結融解履歴を与えた供試体は、地盤工学会基準に準じた凍上試験方法を用いて凍上させました。凍上試験では、下盤温度を $-0.1^{\circ}\text{C}/\text{hour}$ の降下速度で制御し、凍上変位が停滞するまで継続しました。融解過程は、一面せん断試験装置のせん断箱内で実施しました。

凍上試験ならびにせん断試験中の鉛直応力 $\sigma$ については、粘着力 $c$ と内部摩擦 $\phi$ を求める目的で、三段階に設定しました。定圧一面せん断試験も地盤工学会基準に準じて実施しており、上下せん断箱

間隔は0.2mm、せん断変位速度は0.02mm/min、最大水平変位は7mmとしました。せん断は約24時間の圧密過程を経た後に行い、せん断位置は供試体底面から10mmとしました。

図2は凍上試験後の供試体のX線CTスキャン画像です。供試体内部に多数のアイスレンズが形成されており、大きく凍上している様子が観察できます。

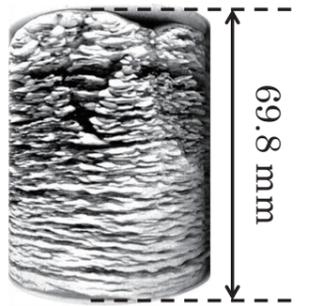


図2：凍上試験後の供試体のX線CTスキャン画像

図3は定圧一面せん断試験の結果です。図から、未凍結状態、凍結融解履歴を与えた状態ともに、鉛直応力 $\sigma$ が増加するに従って、せん断応力 $\tau$ も増加する傾向が確認できます。

図4は定圧一面せん断試験で得たせん断応力 $\tau$ と鉛直応力 $\sigma$ の関係をプロットし、各供試体の粘着力 $c$ と内部摩擦 $\phi$ を求めたものです。まず、凍結融解履歴を与えた状態の $c$ は未凍結状態に比べて、明らかに低下していることがわかります。一方で、内部摩擦角 $\phi$ については、未凍結状態と凍結融解履歴を与えた状態で大きな違いは認められませんでした。

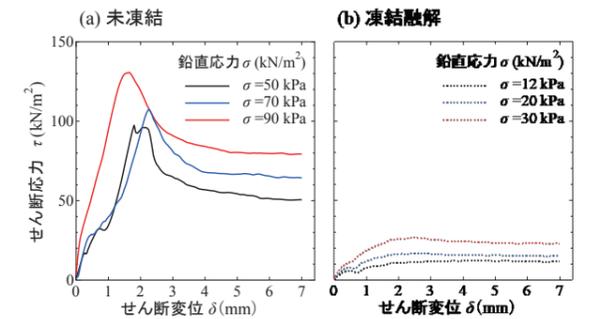


図3：定圧一面せん断試験結果

図5は安定解析の結果です。ここでは、実際に凍上被害が発生した岩盤斜面の勾配である $\theta=45^{\circ}$ の斜面を想定して安定解析を行い、安全率 $F_s$ を求めました。図から、凍結融解履歴を与えた状態の安全率は、未凍結状態に比べて、明らかに低下していることがわかります。特に、凍結融解履歴を与えた状態では深度が0.7mを超えると、設計に用いられる安全率1.2を下回っています。この深度は、この岩盤斜面で計測された最大凍結深さとよく一致しています。これらの結果から、凍結融解履歴が岩盤斜面の極めて大きな影響を与えていることが明らかになりました。

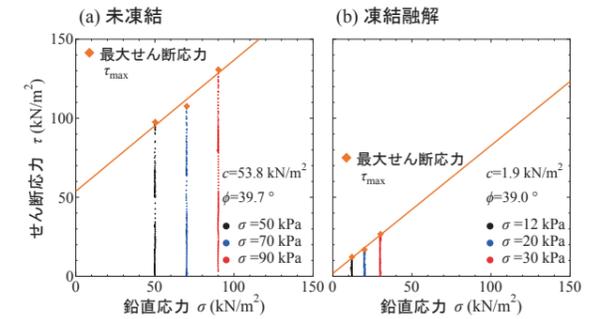


図4：定圧一面せん断試験結果

本研究は、公益財団法人寿原記念財団の支援を受けて行われました。実施にあたり、ご支援いただいた公益財団法人寿原記念財団に対し、心より感謝申し上げます。

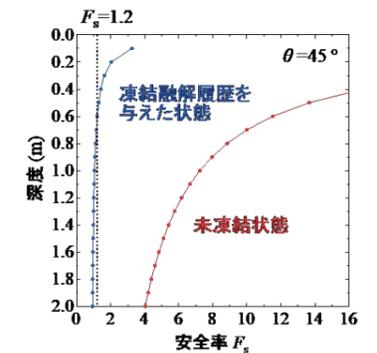


図5：安定の解析結果

# 緑化植物の生育状況が植生工の侵食防止効果に与える影響



教授  
中村 大

## Highlights

- 緑化植物が成長することで植生工の侵食防止効果が向上することが確認されました。
- 本研究の試験条件下では播種から8週間程度の生育期間で十分な侵食防止効果が得られることが明らかとなりました。

一般的に、植生工の成績判定は、緑化植物の生育状況を目視観察することで行われます。その目的は主に、目標とする植物群落が適切に形成されているかを評価することにあります。しかしながら、植生工には単なる緑化目標の達成だけでなく、雨水による侵食防止や表層崩壊の抑制といった機能も求められますが、こうした機能を評価するための定量的な生育基準は示されていません。

そこで本研究では、緑化植物の有無や生育期間を変えた4種類の供試体を作製し、表流水を模擬した侵食試験を実施することで、緑化植物の生育状況が植生工の侵食防止効果に与える影響を明らかにすることに取り組みました。

本研究では砂質土を締固めた供試体（土供試体）と、これにクサヨシを播種して草本植物を生育させた供試体（植生供試体）を作成しました。供試体は内寸縦450mm、横150mm、高さ100mmの容器内に土壤水分センサーを埋設し、最適含水比に調整した土試料を投入した後、ピストンをプラスチックハンマーで打撃することで作製しました（締固め度 $D_c=85\%$ ）。

図1は播種から12週間が経過した植生供試体の様子です。クサヨシの播種量は発生期待本数を3500本/m<sup>2</sup>に設定し、0.254gとしました。また、クサヨシの生育期間は、播種から4週間、8週間、12週間の3種類に設定しました。

図2は本研究で使用した侵食試験装置の模式図です。供試体を容器ごと傾斜台に設置し、その上にタンク付の水路を据え付けます。傾斜台の勾配は盛土を構築する際に適用される1:1.5としました。流水についてはタンクに貯留された水を越水させることで発生させています。ここでは、流水は幅50mmに拡縮した後に、供試体表面を流れるよう

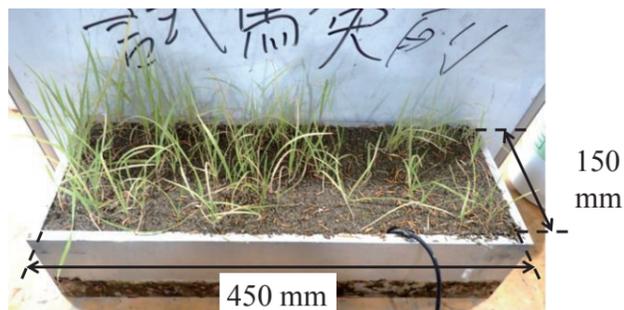


図1：播種から12週間が経過した植生供試体

にしました。流量は1L/minで試験1回当たり30秒流しました。なお、土供試体は締固めた直後に、侵食試験を行いました。

本研究では、侵食痕の観察に写真測量（SfM）を活用しました。なお、写真測量は侵食試験終了後に茎葉を切除した上で実施しています。

図3は各ケースにおける侵食痕のコンター図を示しています。土供試体では、試験開始直後から侵食が進行し、短時間で侵食深さが増大しました。一方で、植生供試体では、試験開始から長時間が経過しても、侵食の進行は抑制されていました。特に、生育期間が8週間および12週間の植生供試体では、試験開始から450秒経過後も上流部分に限定して侵食が生じただけで、深い侵食痕はほとんど形成されませんでした。

図4は積算流出土砂量の経時変化を示しています。生育期間4週間と8週間の植生供試体を比べると、明らかに8週間の方が、流出土砂量が減少していることがわかります。また、生育期間8週間と12週間では、流出土砂量に大きな違いはありませんでした。以上の試験結果から、緑化植物が成長することで植生工の侵食防止効果が向上することが確認され、本研究の試験条件下では播種から8週間程度の生育期間で十分な侵食防止効果が得られることが明らかとなりました。

今後も研究を継続し、植生工の侵食防止効果と緑化植物の生育状況との関係を定量的に評価することで、植生工が十分な侵食防止効果を発揮するための緑化植物の生育基準を明らかにしていきます。

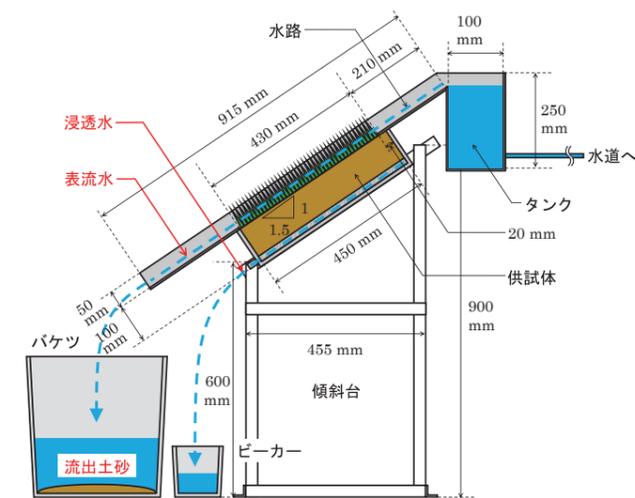


図2：侵食試験装置の模式図

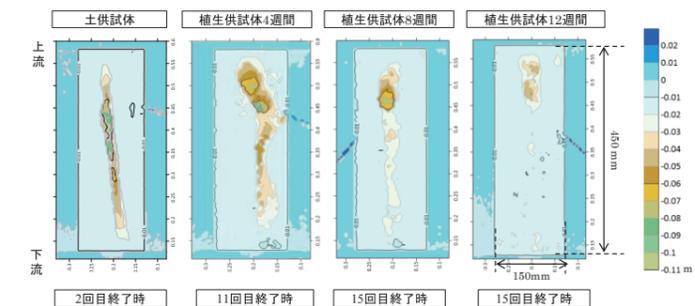


図3：侵食痕のコンター図

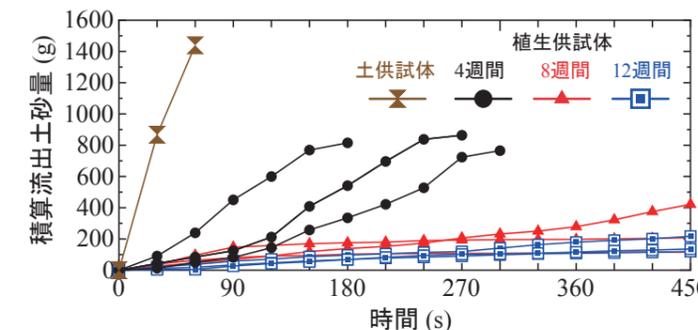


図4：積算流出土砂量の経時変化

# 衛星データ時系列解析と機械学習による モンゴル・ウランバートル周辺の アイシングと地盤変状危険箇所の抽出



准教授  
渡邊 達也

## Highlights

- 干渉SAR時系列解析から、ウランバートル周辺での凍上・沈下や永久凍土融解による地盤変動発生箇所を抽出しました。
- 光学衛星データを用いて、アイシング発生箇所の自動抽出方法を検討しました。

モンゴル国の首都であるウランバートルは、永久凍土が広がる寒冷な気候環境に位置しています。このため、地盤の凍結融解サイクルにより凍上や沈下が発生し、地盤に大きな変動が生じることがあります。さらに、地球温暖化の進行に伴い永久凍土が融解することが原因で、各地で地盤沈下が発生しています。河川沿いの低地では、冬季に湧水や地下水、河川水が地表にしみ出し、繰り返し凍結することにより、アイシングと呼ばれる層状の氷塊が形成されます。



図 1：凍上・沈下により生じた道路の変状

近年、ウランバートルでは急速な都市化と人口集中が進行していますが、郊外ではインフラ整備が不十分であることに加え、土地条件の悪い場所に低所得者層の住宅地が形成されるケースも見受けられます。凍上や沈下、さらに永久凍土融解による地盤変動は、住宅やインフラに深刻な影響を及ぼす恐れがあります(図1)。また、アイシングは冬季の結氷や春先の洪水によって被害をもたらすだけでなく、下水道の未整備により生活排水が混入し、衛生環境の悪化を引き起こす要因ともなっています(図2)。



図 2：アイシングの結氷被害を受けた家屋

したがって、凍上性地盤、永久凍土、さらにはアイシングの分布およびこれらの長期的な変化を把握することは、ウランバートル周辺の都市計画や地盤環境の監視において極めて重要な課題です。そこで本研究では、リモートセンシングデータを活用し、ウランバートル周辺における地盤変動

の分析とアイシングの自動抽出手法の構築に取り組みました。

地盤変状箇所の抽出は、ALOS-2およびSentinel-1の合成開口レーダー (SAR) データを用い、干渉SAR時系列解析により実施しました。その結果、主にウランバートル郊外の谷底平野の低湿地帯で顕著な地盤変動が確認され、融解期には0.10~0.20mの地盤沈下が、凍結期には同程度の凍上が見られました(図3)。また、地盤沈下は4月から6月にかけて急速に進行し、その後は沈静化する傾向が見られました。一方、いくつかの切土斜面においても大きな地盤変動が確認され、切土斜面では春先の沈下に加え、8月下旬以降に再び沈下が加速する傾向が見られました。この結果は、人工改変の影響により永久凍土の融解が進行している可能性を示唆しています。これらの解析結果を踏まえて、今後は現地での実態調査や観測を進めていく予定です。

アイシング分布域の抽出には、Sentinel-2の光学衛星データとALOS全球数値地表モデル(AW3D30)を用いて実施しました。Sentinel-2のデータでは、まず正規化積雪指数(NDSI)を用いて雪氷面の領域を絞り込み、その後FalseColor画像を作成しました。そして、Pythonのオープンソース機械学習ライブラリscikit-learnを用いたk-means法によりクラスタリングを実施し、雪と氷の判別を行いました。さらに、AW3D30データを用いたGIS解析により、アイシングが形成されやすい低平地の領域を絞り込むことで、抽出精度の向上を図りました(図4)。その結果、山間部では良好な精度でアイシングの分布域を自動抽出することができました。一方、市街地では氷と類似した反射特性を持つ物体が存在するため、FalseColor画像を用いたクラスタリングがうまく機能しない現象が生じました。今後は、これらの原因を特定し、抽出アルゴリズムに改良を加えることで、市街地における抽出精度の向上を図っていく予定です。

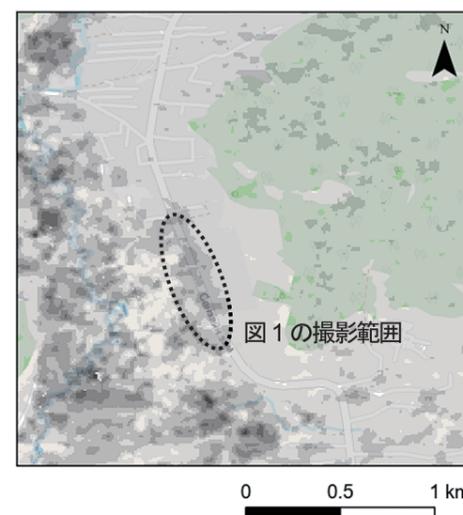


図 3：2024年4~9月の地盤沈下分布図の例

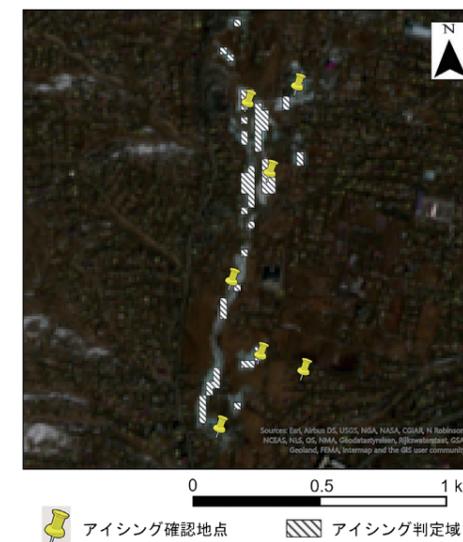


図 4：アイシング自動抽出結果の例

# 北海道の豪雪地における 1月の積雪堆積環境調査



## Highlights

■ これまであまり明らかにされていない、北海道の豪雪地における1月(厳冬期)の積雪断面観測を実施しました。両地点とも、1月中旬の時点で積雪水量が400mmを超え、重い雪質が大部分を占めていることがわかりました。

上川総合振興局管内は、北海道でも有数の豪雪地(国が指定する特別豪雪地帯に立地)として知られ、大雪シーズンには市街地でも最深積雪が2mを超えることも珍しくありません。その中でも音威子府村と幌加内町では、2024/25年冬期もそれぞれ173cm、184cmに達し(2025年2月24日時点)、ニュースでも大きく取り上げられました。この2地点では以前から積雪調査が行われていますが、記録の多くは2月下旬から3月上旬の融雪出水直前期に行われたものであり、厳冬期である1月の調査結果は限られます。そこで今回、1月中旬に現地を訪問し、積雪の観測を実施しました。

図1に、2箇所の調査結果を示します。図の両端は断面の写真で、中央は層位および雪質、積雪水量を整理したものです。両地点、いずれもしまり雪やざらめ雪が積雪の大部分を占めていることがわかります。

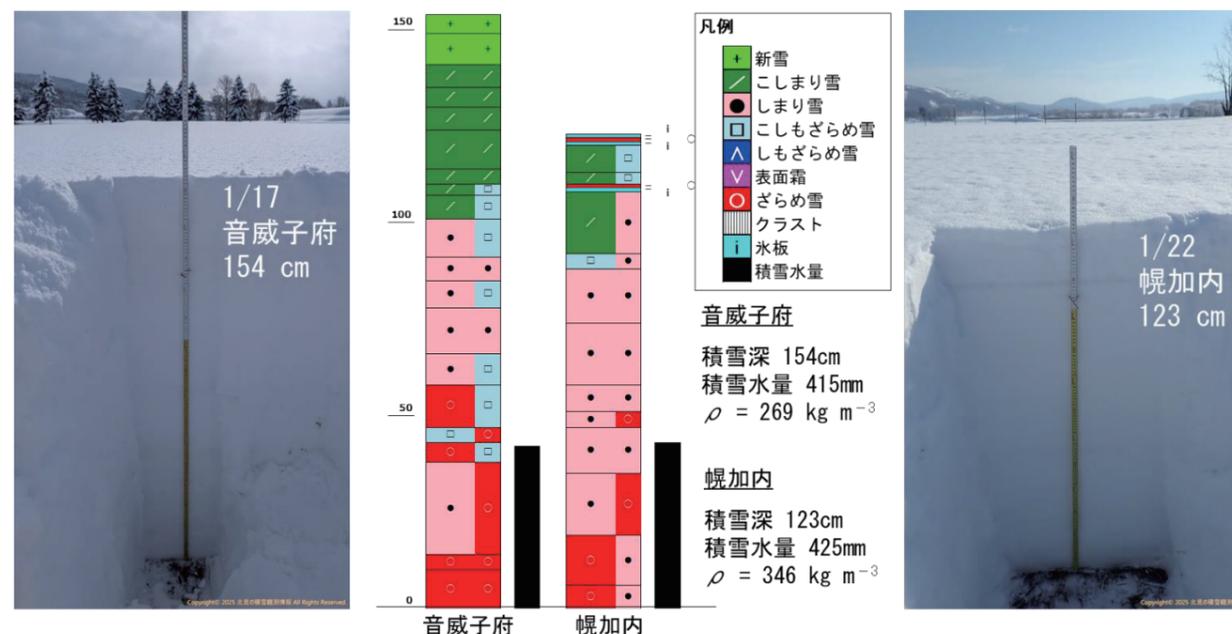


図1：北海道の豪雪地における1月の積雪堆積環境(音威子府：2025年1月17日、幌加内：同22日)

1箇所目は、音威子府です。同地では、かつて積雪荷重の作用により橋の主桁が変形するなど、大雪による問題が顕在化しています(このSAFER年報における筆者らの別記事で報告しています)。同地では、2025年1月17日に観測を実施しました。当日の積雪深は154cm、積雪水量(=積雪を融かして水にしたときの水深;単位面積(1m<sup>2</sup>)あたりの質量(kg)に相当)は415mmでした(図1、図2左)。積雪層を観察すると、下層は密度の値が高い雪質(ざらめ雪、しまり雪)が主体となっています。全体に粒径は小さく、きめ細かい特徴が見られました。上層は新雪、こしまり雪で構成されていますが、同地では14日、15日の2日間で計54cmの降雪がありました。その時に積もった層とみられます。調査を実施した17日には、国道40号の同村内で雪崩事故が発生していますが、一度にまとまった降雪があった場合、それ以前に積もった雪との境界の結合力が弱いと雪崩や屋根からの落雪が起きることがあるので注意が必要です。

2箇所目は、幌加内です。こちらも北海道内有数の豪雪地として有名です。同22日に訪問したときの積雪深は123cm、積雪水量は425mmでした(図1、図2右)。調査実施日の数日前は気温が高く推移し、雪面やその少し下にはざらめ雪や氷板ができていました。全般にしまり雪主体で重く、積雪水量も高い値でした。このような積雪コンディションの日は、屋根からの落雪には十分に注意が必要です。

この調査にご協力頂きました、音威子府村役場様、北海道幌加内高校様はじめ関係者の皆様に御礼申し上げます。

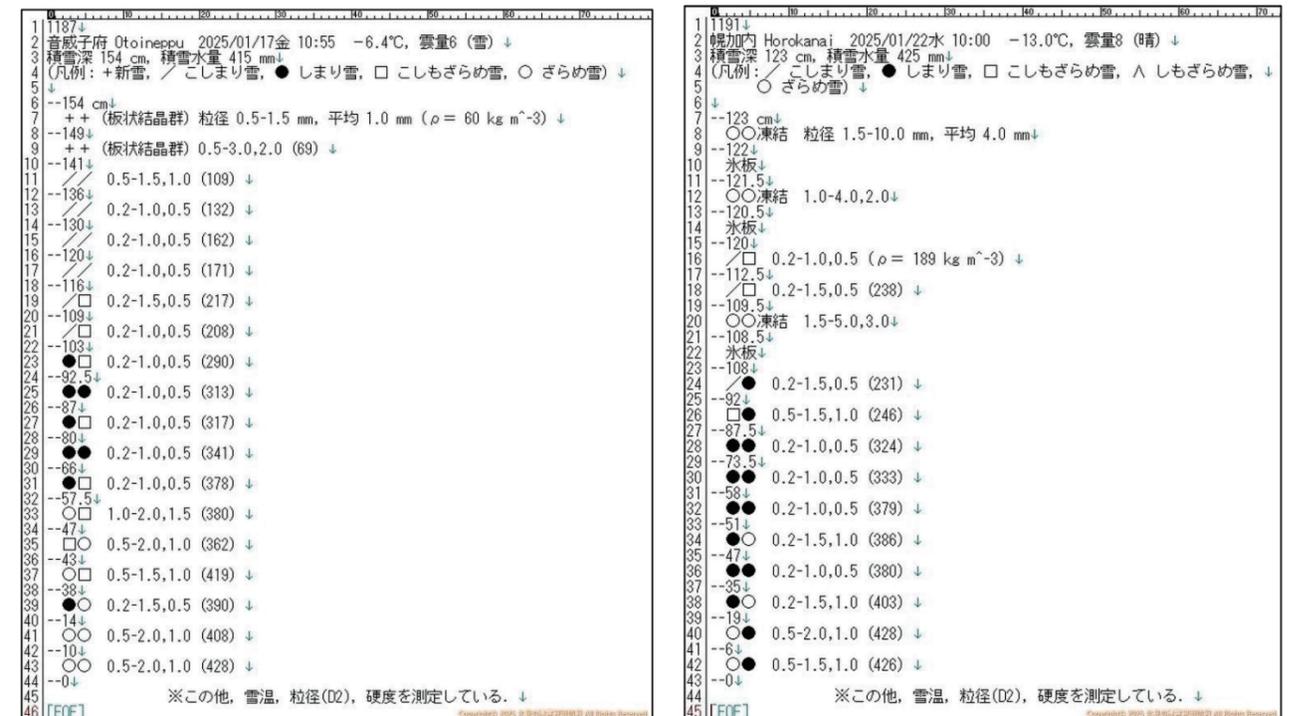


図2：積雪断面観測の調査速報 左：音威子府、右：幌加内

# 記録的大雪に見舞われた 2025年2月帯広における積雪調査



部門長・准教授 気象予報士  
白川 龍生

## Highlights

- 北海道帯広市における2月の記録的大雪後に実施した積雪観測結果を報告しました。
- 帯広のような寡雪地で、短時間に大量の雪が積もるケースは珍しく、観測事例は限られます。そのため、今回報告した積雪調査結果は、今後の雪氷・気象防災上の貴重なデータとなります。

2025年2月3日から4日にかけて、北海道帯広市では観測記録を更新する大雪となりました。同3日正午の積雪は5cmでしたが、24時間で124cm増加し、最深積雪は129cmに達しました(図1)。降雪量は、同4日午前5時までの6時間で85cm、午前9時までの12時間で120cmであり、特に後者は日本国内の12時間降雪量として最高記録更新となります。北海道の寡雪(かせつ)地で、短時間に大量の雪が積もるケースは稀です。さらに、その痕跡が残っている状態で行われた積雪観測事例は限られるため、筆者は大雪から3日後の2月7日、帯広畜産大学野球場(帯広市稲田町)にて積雪断面観測を実施しました。

図2aは積雪断面の写真です。図中、矢印の部分が今回の大雪で積もった層と推定され、最下層を除く積雪の大部分は短時間で形成されていたことがうかがえます。

図2bは積雪各層の層位と雪質判定結果を示しています。積雪各層は、多くの場合、1種類の雪質からなりますが、その一方で、2種類の混合や中間段階も存在します。その場合は雪質1・雪質2として両者を併

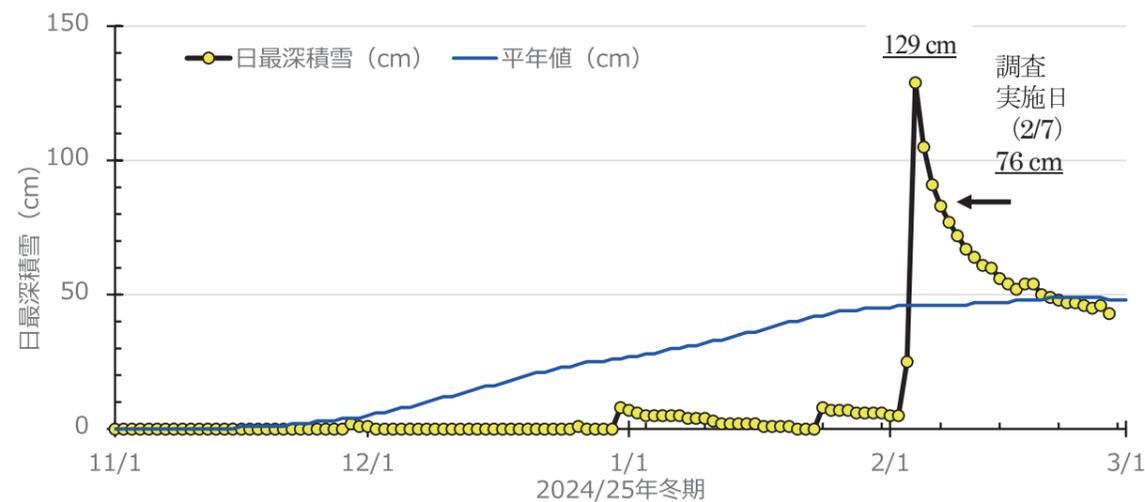


図1：2024/25年冬期における帯広の日最深積雪の推移(2025年2月27日現在)  
日最深積雪および同平年値は、気象庁ウェブサイトから引用

記しました(例：新雪・こしまり雪)。本調査では、雪質1(左側)を優勢となる雪質として記録しています。最下層のざらめ雪(水を含み粗大化した積雪粒子；この場合は凍結ざらめ雪)は今回の大雪の前から存在した層と推定されますが、その上の各層は今回の大雪で新たに積もった部分と考えられます(図中の矢印；図2aの矢印に対応)。

また、積雪水量も計測しています(図2bの右下)。積雪水量とは、積雪を融かして水にしたときの水深です。積雪深は、圧密や新たな降雪によって変動が生じやすいのですが、積雪水量は厳冬期の場合、融雪出水期まで値が積算されるため、積雪深に比べ値の変動が小さく、冬期の積雪特性を把握しやすい値といえます。当日計測した積雪水量は102mmで、これは単位面積(1m<sup>2</sup>)あたり102kgの雪が载荷していることを意味します。最下層(大雪になる前からの積雪)の水量(11mm)を差し引くと、今回の大雪は91mmの水量に相当する雪が積もったこととなります。期間中、帯広測候所の露場で記録された降水量の合計は90mmであり、今回の積雪水量実測値はこの値とほぼ一致していました。

この観測を実施するにあたり多くの方にご協力をいただきました。ここに記し、感謝申し上げます。

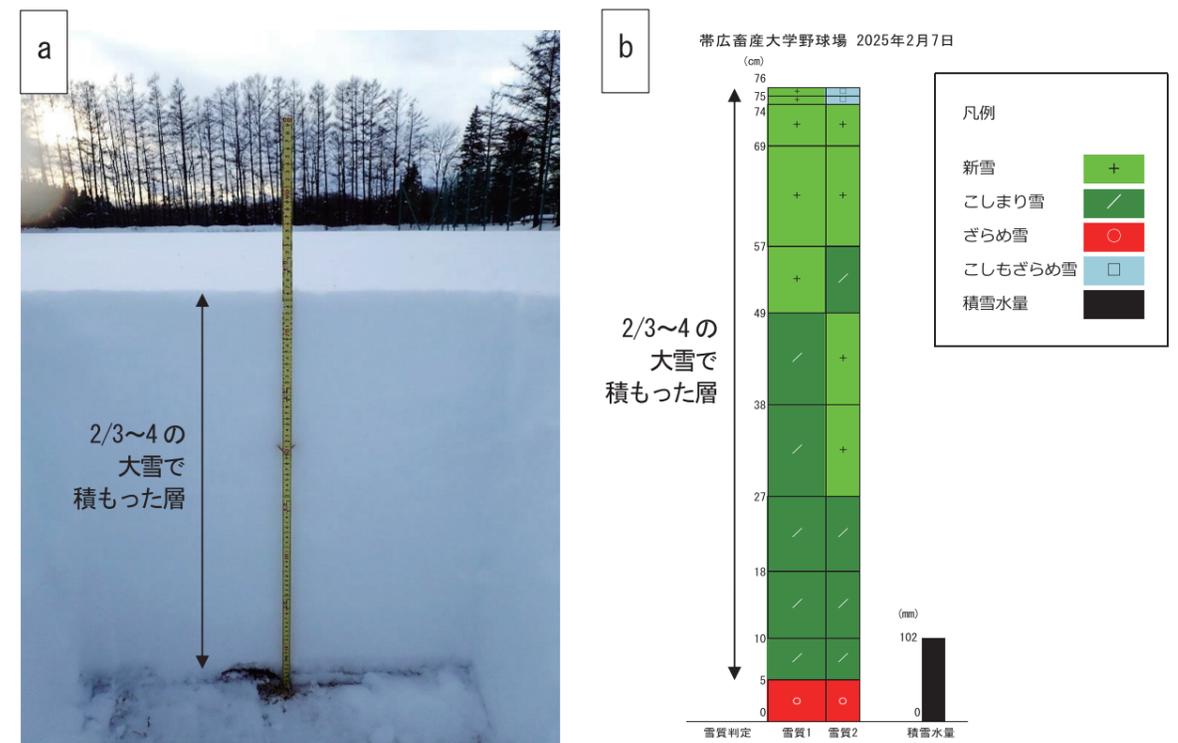


図2：帯広畜産大学野球場における積雪断面観測結果(2025年2月7日)  
(a) 積雪断面写真(15:30頃撮影)、(b) 積雪層位図(積雪深：76cm)

# 北海道太平洋沿岸地域における津波避難可能性の傾向分析



准教授  
齊藤 剛彦

## Highlights

- 北海道太平洋沿岸の地震防災対策推進地域では、津波浸水範囲外への徒歩での避難が困難な地区が複数あると考えられます。
- それらの地区では指定緊急避難場所として、既存の高い構造物が活用されています。

本研究グループでは、北海道の太平洋沿岸地域で、津波発生時に浸水範囲外への徒歩での避難が困難と考えられる釧路市やむかわ町を対象に、津波の想定浸水深よりも高い構造物を活用した場合の津波避難可能性について検討してきました。これらの研究成果をもとに本研究では、その他の地震防災対策推進地域の津波避難可能性や進められている対策について、各市町村で公表されている情報を調査して、地区ごとの特徴について分析しました。

対象としたのは北海道太平洋沿岸で、むかわ町から東に位置する18市町です。これらの市町では巨大海溝型地震の発生から最短22分で津波が押し寄せます。18市町をハザードマップの地区ごとに92地区に分割し、地域防災計画、ハザードマップ、津波避難計画を調査し、津波浸水範囲や人口データなどを用いて分析しました。

津波の第一波到達までに徒歩で浸水範囲外に避難できると考えられる地区を「避難可能地区」とし、第一波到達までに徒歩で浸水範囲外に避難が難しいと考えられる地区を「避難困難地区」と定義して、全92地区を浸水面積の大きさとハザードマップ等から比較した結果、避難可能地区は約68%の63地区、避難困難地区は約32%の29地区と分類しました。このことから本研究の対象地域はすべて地震防災対策推進地域ですが、3分の2の地区は現状でも避難が可能であり、対策が必要な地区に重点的に対応できると考えています。

浸水面積による避難可能地区と避難困難地区の分布を図1に示します。浸水範囲が広がるほど避難困難の割合が大きくなる傾向が読み取れます。ここで、浸水面積が0~2km<sup>2</sup>の地区は43地区ありますが、5地

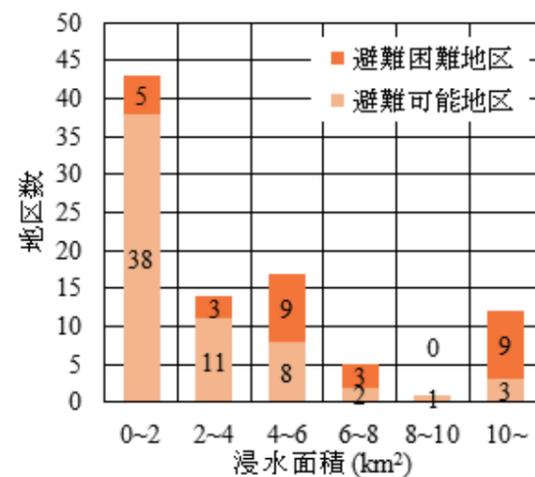


図1 浸水面積による避難可能地区と避難困難地区の分布

区は避難困難と判別されます。これらは隣接する地区にも浸水範囲が広がっている地区や、河川に沿って浸水範囲が広がっている地区で、浸水面積が小さくても避難が難しい地区と考えました。また、浸水面積が10km<sup>2</sup>以上でも避難可能地区が3地区あります。これらは地区全体の面積が大きいために浸水面積が大きいことと、総人口が150人未満と少ないためです。

避難が困難な地区の対策として、津波の浸水深よりも高い構造物を一時的な避難場所として活用する津波避難ビル等があり、公共施設だけでなく、民間施設も津波避難の一時的な避難施設として指定され、ハザードマップに示されています。避難困難地区29地区のうち、浸水内に1箇所以上避難場所のある地区は17地区であり、ほとんどが市街地です。

ここで、浸水面積と避難場所数の割合を図2に示します。これは、津波到達前に避難場所にたどり着くことができるかどうかの指標となります。例えば、避難対象地域のどこからでも1km以内に緊急避難場所又は津波緊急避難施設があることを一つの目安として考えると、1つの避難場所がカバーできる面積は約3km<sup>2</sup>です。図2から、外れ値の2地区を除く4分の3の地区がこの目安を下回っており、この指標からは、既存の高い構造物を津波避難に活用することで、一定の対策が講じられていると考えることができます。

次に、浸水人口と避難場所数の割合を図3に示します。これは、避難場所の収容力に関する指標となります。中央値は758人/棟、平均値は979人/棟と、構造物の収容力から考えると広く分布しています。

一方で、浸水内に避難場所のない避難困難地区が12地区あります。少なくともこれらの地区では別の対策が必要であり、自動車避難の検討や、新たな避難場所の整備が計画されている地区があります。

津波避難対策は各市町村や各地区によって計画・実施されるものであるため、取り組みの状況に違いがありますが、北海道のみならず全国での事例から学び、取り入れていくことが重要です。

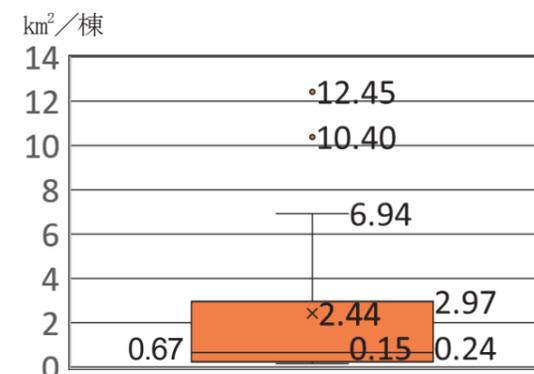


図2 浸水面積と避難場所数の割合

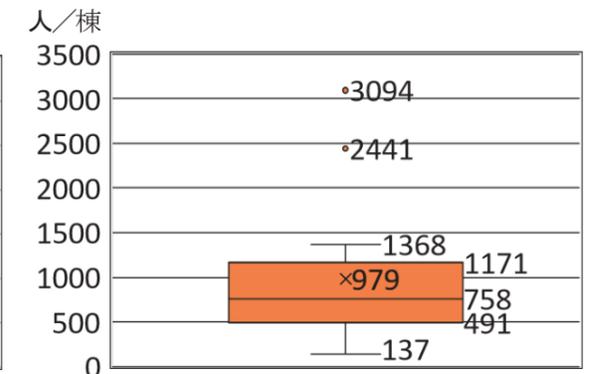


図3 浸水人口と避難場所数の割合